

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Jakub Vanc

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Nebezpečné vlivy nadzemního vedení přenosové soustavy na sdělovací
vedení**

**Dangerous effects on communication line due to overhead transmission
line**

2018

Bc. Jakub Vanc

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Vanc**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Nebezpečné vlivy nadzemního vedení přenosové soustavy na sdělovací vedení**
Dangerous effects on communication line due to overhead transmission line
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rušivé vlivy nadzemního vedení přenosové soustavy
2. Řešení vlivu 3fázového vedení na sdělovací vedení
3. Návrh opatření pro omezení vlivu přenosové soustavy na sdělovací vedení

Seznam doporučené odborné literatury:


Tlustý, J. a kol.: Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha : ČVUT, 2011. 254 s. ISBN 978-80-01-04939-6

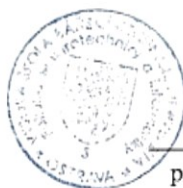
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

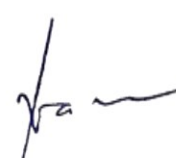
Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne: 25. dubna 2018



.....
Bc. Jakub Vanc

Poděkování

Rád bych chtěl touto cestou poděkovat společnosti ČEPS Invest, a.s. za to, že mi umožnila vypracovat diplomovou práci a také za poskytnutí podkladů pro její vypracování. Jmenovitě především konzultantce Ing. Lucii Vanišové za cenné rady a připomínky k této práci. Rád bych chtěl také poděkovat vedoucímu doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za veškerý věnovaný čas při konzultacích a za odborné rady k této diplomové práci.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na elektromagnetickou kompatibilitu silového vedení přenosové soustavy a sdělovacího kabelového vedení. Popisuje nebezpečné rušivé vlivy způsobené mimořádnými stavy silového vedení na sdělovací kabelové vedení, podrobně rozebírá postup řešení výpočtu vlivem vzniklého indukovaného napětí ve sdělovacím kabelu a to za pomoci normovaného postupu výpočtu a také pomoci programu EMTP-ATP. Hlavním cílem této práce je vypočítat složitější reálnou situaci induktivního vlivu a ověřit schopnost možnosti výpočtu programem EMTP-ATP. Závěr je věnován možné eliminaci vniklých rušivých vlivů.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, přenosová soustava, sdělovací vedení, EMTP-ATP

Abstract

This thesis deals with electromagnetic compatibility of overhead transmission line and communication line. It describes dangerous disruptive effect caused extraordinary condition of overhead transmission line on communication line. It discusses in detail calculation process of disruptive effect creating induced voltage in communication line with using the standardized calculation process and with program EMTP-ATP. The main objective of this thesis is calculate more difficult real situation of inductive effect and verify the ability to calculate program EMTP-ATP. The conclusion is attention the possibility elimination of arising disruptive effects.

Key words

Electromagnetic compatibility, transmission system, communication line, EMTP-ATP

Obsah

Seznam použitých symbolů	10 -
Seznam použitých zkratk.....	11 -
Seznam obrázků	12 -
Seznam tabulek.....	13 -
Úvod.....	14 -
1 Základní pojmy, rozdělení EMC	15 -
1.1 Elektrizační soustava.....	15 -
1.1.1 Přenosová soustava.....	16 -
1.1.2 Rozvoj soustavy.....	16 -
1.1.3 Projektování vedení	17 -
1.2 Elektromagnetická kompatibilita [7], [14]	17 -
1.3 Způsoby šíření rušení a elektromagnetické vazby	18 -
1.3.1 Induktivní vliv	19 -
1.3.2 Kapacitní vliv	20 -
1.3.3 Galvanický vliv.....	20 -
1.4 Účinky vlivů.....	21 -
2 Řešení vlivu třífázového vedení na sdělovací vedení.....	22 -
2.1 Zjištění měrných parametrů výpočetních úseků.....	23 -
2.2 Výpočet indukčního vlivu	25 -
2.2.1 Činitel současnosti	26 -
2.2.2 Zkratový proud	26 -
2.2.3 Vzájemná indukčnost.....	27 -
2.2.4 Výsledný redukční činitel	31 -
2.3 Výpočet galvanického vlivu.....	33 -
2.4 Meze nebezpečných induktivních a galvanických vlivů	34 -
2.5 Vzorový výpočet	36 -
2.5.1 Řešený manuálním postupem	36 -
2.5.2 Řešený programem EMTP-ATP.....	38 -
3 Analýza nebezpečného vlivu v reálné situaci.....	42 -
3.1 Síť sdělovacích kabelových vedení	42 -
3.2 Ekvivalentní šířky	44 -
3.3 Zkratové proudy	45 -
3.4 Redukční činitel.....	46 -
3.4.1 Redukční činitel trojfázového vedení	46 -

3.4.2	Redukční činitel sdělovacího vedení	- 46 -
3.4.3	Celkový redukční činitel	- 47 -
3.5	Manuální výpočet nebezpečného vlivu	- 47 -
3.5.1	Zpětné úseky	- 49 -
3.5.2	Výsledná hodnota napětí	- 49 -
3.5.3	Zhodnocení	- 49 -
3.6	Výpočet pomocí EMTP-ATP	- 50 -
3.6.1	Model reálné počítané situace	- 50 -
3.6.2	Výstup simulace	- 52 -
4	Opatření pro snížení vlivu indukovaného napětí	- 53 -
4.1	Změna typu sdělovacího kabelu	- 53 -
4.2	Externí stínění pomocí kompenzačních vodičů	- 54 -
4.3	Oddělovací transformátory	- 55 -
4.4	Omezovače přepětí (bleskojistky)	- 56 -
4.5	Použití optických kabelů	- 57 -
	Závěr	- 58 -
	Literatura	60

Seznam použitých symbolů

a	(m)	ekvivalentní šířka daného výpočetního úseku
a_0	(m)	krajní šířka výpočtového úseku v místě křížení silového a sdělovacího vedení
a_1, a_2	(m)	krajní šířka na začátku a konci výpočtového úseku
a''	(m)	maximální uvažovaná šířka oblasti působení nebezpečného vlivu
A	(-)	magnetický vektorový potenciál
b	(m)	výška indukujícího vedení od povrchu země
c	(m)	výška ovlivněného vedení od povrchu země
I_i	(A)	vektor části zkratového proudu vracející se i-tým vodičem
I_k	(A)	efektivní hodnota jednofázového zkratového proudu
I_K	(A)	vektor jednofázového zkratového proudu
I_Z	(A)	fázor části zkratového proudu
l	(km)	délka výpočetního úseku
l_i	(km)	délka dílčího výpočetního úseku
M	($\mu\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$)	činitel vzájemné indukčnosti
M_i	($\mu\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$)	činitel vzájemné indukčnosti v dílčím výpočetním úseku
n	(-)	počet kompenzačních vodičů
q	(-)	koeficient $q = 1,7811$
r_e	(-)	celkový redukční činitel trojfázového vedení
r_k	(-)	redukční činitel železničních kolejnic
r_s	(-)	celkový redukční činitel sdělovacího vedení
r'_s	(-)	redukční činitel sdělovacího kabelu
r_t	(-)	redukční činitel kompenzačních vodičů
r_v	(-)	výsledný redukční činitel
r_z	(-)	redukční činitel zemnicího lana
U_{dov}	(V)	dovolená mez indukovaného podélného napětí
U_i	(V)	indukované napětí
U'_i	($\text{V} \cdot \text{km}^{-1}$)	hodnota podélného napětí v kovovém obalu kabelu
U_n	(V)	napájecí napětí
U_z	(V)	zkušební napětí obvodové izolace kabelu

x	(-)	výpočetní parametr
x'	(-)	výpočetní parametr $x' = a \cdot \alpha$
Z_a	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	střední hodnota měrné vlastní impedance kompenzačních vodičů
Z_{az}	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	střední hodnota měrné vazební impedance mezi sdělovacím vodičem a kompenzačními vodiči
α	(-)	koeficient $\alpha = \sqrt{\mu_o \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\rho}} = 0,00281 \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}$
ρ	($\Omega \cdot \text{m}$)	měrný zemní odpor
ω	(rad^{-1})	úhlová rychlost
ω'	(-)	činitel současnosti

Seznam použitých zkratek

CETIN	Česká telekomunikační infrastruktura
EIA	Environmental Impact Assessment
EMTP-ATP	Výpočetní software pro modelové situace
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
Rozv	Rozvodna
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvlášť vysoké napětí

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy [4].....	- 15 -
Obr. 1.2 Mapa přenosové soustavy České republiky k datu 31.12.2016 [12].....	- 16 -
Obr. 1.3 Základní řetězec EMC [14].....	- 17 -
Obr. 1.4 Induktivní vliv [2]	- 19 -
Obr. 1.5 Kapacitní vazba [2]	- 20 -
Obr. 2.1 Skutečný a zidealizovaný průběh sdělovacího vedení k ose silového vedení.....	- 23 -
Obr. 2.2 Rozdělení zidealizovaného průběhu na výpočetní úseky.....	- 23 -
Obr. 2.3 Vykreslení ekvivalentních šířek pro dané výpočetní úseky	- 25 -
Obr. 2.4 Průběh zkratového proudu trojfázovým silovým vedením [8].....	- 27 -
Obr. 2.5 Grafické zobrazení situace	- 28 -
Obr. 2.6 Grafická situace výpočetních úseků pro vzorový výpočet.....	- 36 -
Obr. 2.7 Karta nastavení zdroje napájení	- 38 -
Obr. 2.8 Karta nastavení výpočetního úseku – záložka Model	- 39 -
Obr. 2.9 Karta nastavení výpočetního úseku – záložka Data	- 40 -
Obr. 2.10 Model simulace vzorového příkladu.....	- 40 -
Obr. 2.11 Graf průběhu indukovaného napětí v počítaném výpočetním úseku I.	- 41 -
Obr. 3.1 Situační znázornění projektované trasy Řeporyje - Mírovka.....	- 42 -
Obr. 3.2 Náhled celé výpočetní situace.....	- 43 -
Obr. 3.3 Rozdělení počítaného kabelového vedení krajními šířkami	- 44 -
Obr. 3.4 Graf průběhu proudů projektovaného vedení Řeporyje - Mírovka.....	- 45 -
Obr. 3.5 Nosný stožár typ „portál“	- 46 -
Obr. 3.6 Příklad vyobrazení zpětných úseků.....	- 49 -
Obr. 3.7 Model počítaného kabelového vedení.....	- 51 -
Obr. 4.1 Sdělovací kabel typu TCEPKPFLE (vlevo) a TCEPKPFLEZE (vpravo) [15].....	- 53 -
Obr. 4.2 Poziční vyobrazení kompenzačních vodičů	- 54 -
Obr. 4.3 Ochrana sdělovacích vedení oddělovacími transformátory [8].....	- 55 -
Obr. 4.4 Obvodové zapojení dvou a trojelektrodové bleskojistky doplněné jiskřištěm [9]	- 56 -
Obr. 4.5 Omezovače přepětí typu BB a BTR se zásobníkem [16].....	- 56 -
Obr. 4.6 Sdělovací optický kabel [15].....	- 57 -

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Rozsah požadovaných výpočtů nebezpečných vlivů pro jednotlivý druh a typ vedení [8] - 22 -	
Tab. 2.2 Redukční činitel při vzdálenosti sdělovacího vedení do 20 m od kolejnic [8]..... - 33 -	
Tab. 2.3 Hodnoty mezí nebezpečného indukovaného napětí pro indukční a galvanický vliv [8]..... - 34 -	
Tab. 3.1 Vypočtené hodnoty indukovaných napětí v jednotlivých výpočetních úsecích..... - 48 -	

Úvod

Se stoupající výrobou a spotřebou elektrické energie obyvateli roste i nutnost rozšiřovat energetická zařízení přenosové soustavy. S tím souvisí i nutnost posilování stávající přenosové soustavy novými vedeními. Takto nově vystavená a modernizovaná vedení napěťové hladiny 400 kV mohou sebou nést svým provozem nepříznivé účinky na své okolí, obecně lze mluvit o elektromagnetické kompatibilitě.

Tato diplomová práce má za úkol blíže osvětlit problematiku možné interference silového vedení přenosové soustavy 400 kV na sdělovací především kabelové vedení. Dílo má čtyři části – základní teoretický rozbor, rozbor početního postupu k zjištění míry nebezpečného vlivu, výpočet reálné situace s možností ověření výpočtu za pomoci programu EMTP-ATP a závěrem způsoby zamezení vzniklých vlivů.

Samotný začátek diplomové práce je zaměřen na obecně vzatou problematiku elektromagnetické kompatibility. Krom krátkého představení je uvedeno i základní rozdělení a posléze zaměření na přiblížení se k problematice rušivých vlivů silového nadzemního vedení na své okolí.

Druhá část je věnována teoretickému rozboru způsobu výpočtu obecné situace. Postupně je rozebrán způsob možného částečného zjednodušení vzniklé výpočetní situace a vyjádření všech podmínek a hodnot potřebné k získání finální hodnoty. Tato část obsahuje i odvození vzájemné indukčnosti mezi silovým a sdělovacím vedením. Závěrem je proveden vzorový výpočet zjednodušené situace a ověření možnosti výpočtu programu EMTP-ATP.

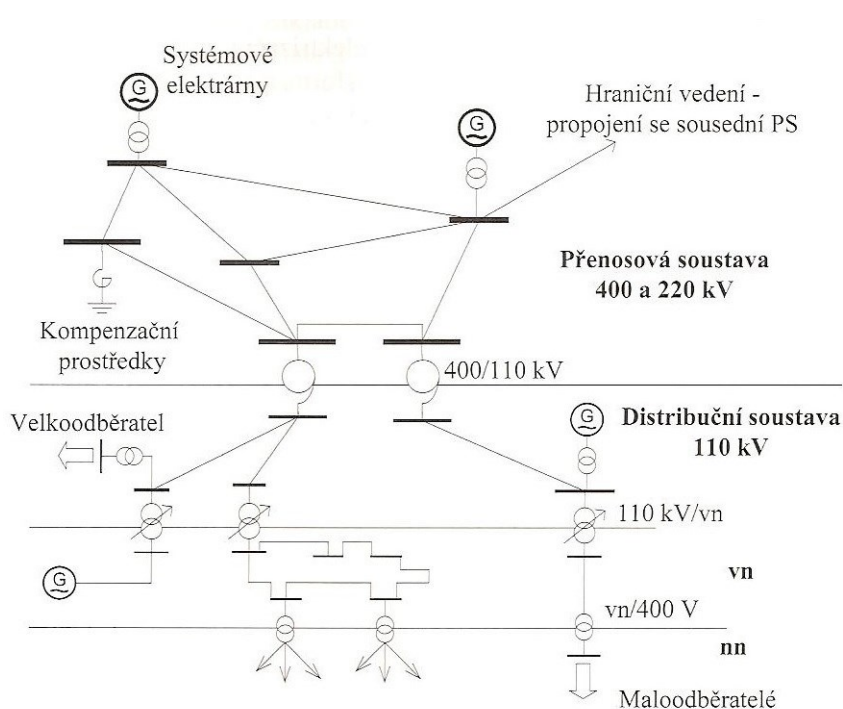
Následující část se zabývá rozбором a výpočtem konkrétní reálné situace možných nebezpečných vlivů projektovaného silového vedení přenosové soustavy V413 v úseku Řeporyje – Mírovka na síť podzemních sdělovacích kabelů nacházející se v jeho blízkosti. Výpočet je proveden normovaným postupem výpočtu a porovnán výpočtem programu EMTP-ATP.

Závěrečná část je zaměřena na způsoby a možnosti eliminace vzniklých rušivých vlivů.

1 Základní pojmy, rozdělení EMC

1.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava slouží k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby. Základ elektrizační soustavy tvoří síť rozdělená na jednotlivé napěťové hladiny. Tato síť se zjednodušeně skládá z výroben elektrické energie, elektrických sítí a elektrických stanic. Celková elektrizační soustava je rozdělena na dvě části a to na přenosovou a na distribuční soustavu.



Obr. 1.1 Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy [4]

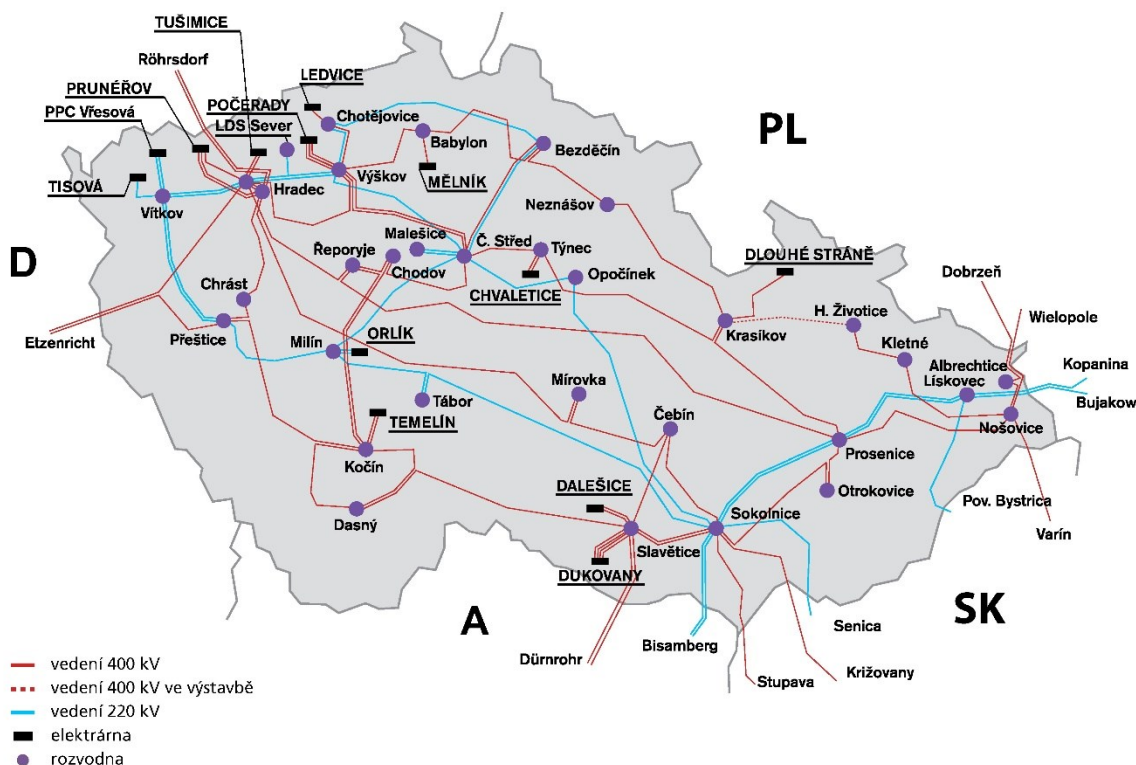
Nejvyšší úroveň tvoří přenosová soustava, sloužící k vyvedení výkonu velkých zdrojů elektrické energie (elektráren), a k propojení se sousedními soustavami pomocí přeshraničních vedení. Přenosová soustava má smyčkový charakter, což znamená, že počet vedení je větší než počet rozvodů. Zatížení přenosové soustavy je určeno nasazením systémových elektráren, výměnou elektřiny (export/import) se sousedními soustavami a tranzitními přetoky. Provozovatelem přenosové soustavy České republiky je společnost ČEPS a.s.

Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava, zajišťující rozvod elektřiny k jednotlivým odběratelům. Je tvořena sítěmi 110 kV a nižších napěťových úrovní. Přenáší výkon na kratší vzdálenosti a jsou do ní připojeny elektrárny nižších výkonů. Ve výjimečných případech zajišťuje přeshraniční propojení. [4], [5]

1.1.1 Přenosová soustava

Nedílnou součástí celé sítě přenosové soustavy je elektrické vedení. Zprostředkovává propojení mezi uzly elektrizační soustavy a slouží pro přenos elektrické energie z jednoho do druhého uzlu elektrické sítě. Této úlohy se zastává především vzdušné elektrické vedení hladin 400 kV a 220 kV. Stávající vedení těchto hladin dohromady tvoří okolo 5500 km vedení ať už jednoduchého, tak i zdvojeného případně vícenásobného, rozložené po celé České republice.

Schéma sítě 400 a 220 kV



Obr. 1.2 Mapa přenosové soustavy České republiky k datu 31.12.2016 [12]

1.1.2 Rozvoj soustavy

Vzhledem k nezastavitelnému nárůstu spotřebitelů a jejich výkonových nároků je neustále nutné provádět rozvoj stávající přenosové soustavy a zajišťovat podmínky pro spolehlivý chod celé elektrizační soustavy ve standardních kvalitách. Rozvoj soustavy směřuje především k posilování vnitrostátních a přeshraničních propojení, důležitý je také v kontextu připojování nových zdrojů elektrické energie a jejich možných nerovnoměrných příspěvků a dále posilování vzájemných transformačních vazeb přenosové soustavy a distribučních soustav.

Přenosová soustava České republiky se vlivem své geografické polohy v Evropě významně podílí na přenosech toků výkonů v rámci obchodu s elektrickou energií na evropském kontinentu. Rozvoj přenosové soustavy je koordinován i v rámci mezinárodní spolupráce Asociace evropských provozovatelů přenosových soustav pro elektrickou energii ENTSO-E, jenž je členem i společnost ČEPS a.s. [12]

1.1.3 Projektování vedení

Výstavba nového vedení se řídí všemi zákony platnými pro přípravu a realizaci projektů liniových staveb. Vztahují se na ně veškerá pravidla územního a stavebního řízení, včetně posuzování vlivu stavby na životní prostředí (EIA). To platí i v těch případech, kdy se nové vedení staví v trase vedení stávajícího, ať už jde jen o výměnu za dvojité vedení.

Při projektování úplně nové trasy vedení se vždy hledá kompromisní řešení z technicko-ekonomického hlediska. Vedení přenosové soustavy není úplně esteticky vhodné do přírodního prostředí či obytných oblastí a proto je nutné co nejvíce vyhovět požadavkům všem možným zasaženým oblastem v závislosti k finanční stránce věci. U navrhování nového vedení se musí také počítat a zjišťovat případné nebezpečné jevy, vyvolané budoucím provozem vedení, které mohou nepříznivě ovlivňovat okolí nebo okolní zařízení. Obecně se jedná o elektromagnetickou kompatibilitu. [6], [13]

1.2 Elektromagnetická kompatibilita [7], [14]

Elektrické nebo magnetické systémy či zařízení jakkoliv vazebně spojené se mohou vzájemně ovlivňovat. Tedy mohou být jak zdrojem, tak i přijímačem elektromagnetického rušení. Cest, kterými se rušení může šířit, může být více, např. vzduch, zemnicí soustava, napájecí napětí. Jedná se o vazby galvanickou, indukční, kapacitní nebo o záření.



Obr. 1.3 Základní řetězec EMC [14]

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - je nazývána schopnost elektrického nebo magnetického systému či zařízení fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí, tedy neovlivňovat jiný objekt včetně sebe samotného a odolávat působením ostatních přístrojů.

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) – neboli odolnost, je schopnost systému nebo zařízení být v provozu bez zhoršení provozních charakteristik za přítomnosti elektromagnetických rušení. Míra odolnosti je rozlišována podle citlivosti zařízení na elektromagnetické rušení.

Elektromagnetická interference (EMI) - neboli rušení, které nežádoucím způsobem ovlivňuje funkce elektrického zařízení vyzařovanou elektromagnetickou energií v kmitočtovém spektru od 0 do desítek GHz.

Rozlišuje se:

- **podle vzniku** – přírodní (přirozené), umělé (technické)
- **podle časového průběhu** – impulsní (mžikové), spojitý, kvazi-impulsní
- **podle šířky kmitočtového spektra** – úzkopásmové, širokopásmové
- **podle polohy v kmitočtovém spektru** – nízkofrekvenční (energetické do 2 kHz, akustické do 10 kHz), vysokofrekvenční (od 10 kHz do 400 GHz)
- **podle způsobu šíření** – vedením (vazbou induktivní, kapacitní, galvanickou), vyzařováním

Elektrická zařízení napěťových hladin vn, vvn a zvn jsou velkými zdroji elektromagnetického rušení. V oblasti elektromagnetické kompatibility jsou zařízení vysokých hodnot napětí především zdroji impulsního rušení velkých energií přepětí a impulsních proudů vytvářející obecně elektromagnetické pole ve svém okolí. Takto vniklé nízkofrekvenční elektromagnetické pole síťové frekvence může nejen působit na živé organismy a případně je i ohrozit na zdraví, ale hlavně působit na blízká kovová či elektrická zařízení v blízkosti například silového vedení a ovlivňovat tak jejich normální provozní stav. [7], [14]

1.3 Způsoby šíření rušení a elektromagnetické vazby

Jak už bylo řečeno, mezi zdrojem rušení a rušeným zařízením se nachází vazební cesta, pomocí níž je rušené zařízení ovlivňováno. Tedy podle vzájemné vazby existují tři druhy elektrických rušivých vlivů, ty jsou obecně označovány jako elektrostatické neboli kapacitní, elektromagnetické neboli induktivní a galvanické neboli odporové.

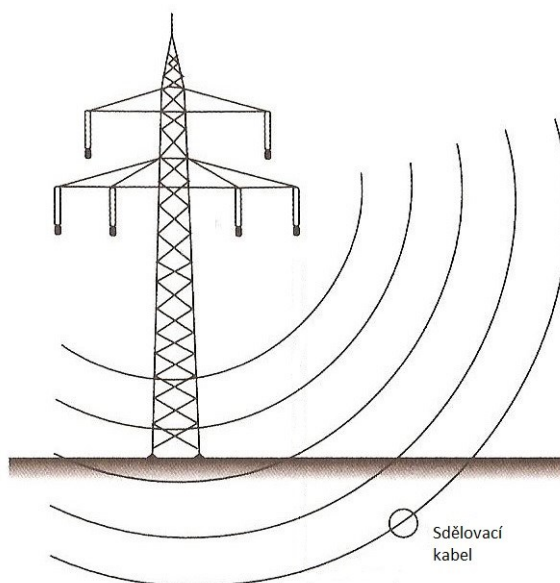
Ať už se jedná o elektrické silové vedení, téměř vždy se okolo něj nachází spousta rušených zařízení kovových (potrubí) či jiných elektrických zařízení (sdělovací vedení), na které má vliv svými provozními případně mimořádnými stavy.

Charakter vlivu elektrického silového vedení se posuzuje podle napěťové hladiny, podle způsobu uložení vedení a především podle typu možné poruchy na silovém vedení závisující na způsobu zapojení středních bodů transformátorů na koncích silového vedení.

1.3.1 Induktivní vliv

Vzhledem k tomu, že země nepůsobí jako elektromagnetický štít, jsou jak nadzemní, tak i podzemní sdělovací vedení vystaveny vlivům střídavého elektromagnetického pole silového vedení. Především jde o případy, kdy nastane jednofázový zkrat na vzdušném silovém vedení.

Zkratový proud procházející silovým vodičem se vrací zpět k rozvodně z části zemnicími lany a z části zemí. Právě část vracející se zemí vytvoří kolem sebe pulzující magnetické pole a to protíná daný sdělovací kabel. Takto vytvořené magnetické pole stojí za vznikem indukovaného napětí, které může dosáhnout hodnot desítek případně stovek voltů. Vše samozřejmě záleží na vzájemné vzdálenosti obou vedení, délce souběhu, odporu země a na několika dalších aspektech ovlivňující celou situaci.



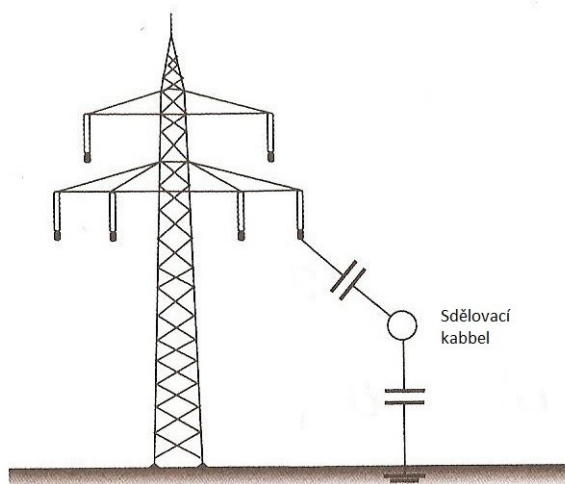
Obr. 1.4 Induktivní vliv [2]

V ideálním případě, kde by v třífázové soustavě procházely ve všech fázích stejné zkratové proudy a vzdálenosti těchto vodičů byly stejné k sdělovacímu vedení, nevzniklo by pak žádné indukované napětí. Ve skutečnosti však není možné této situace dosáhnout z hlediska mizivé pravděpodobnosti vzniku třífázového zkratu a také i rozdílné vzdálenosti silového vedení k sdělovacímu vedení. [1], [2]

1.3.2 Kapacitní vliv

Na rozdíl od induktivního vlivu, kde pozice sdělovacího vedení nad zemí, či pod ní neměnila velikost účinku, zde je tomu jinak. Sdělovací kabel uložený v zemi v blízkosti silového nadzemního vedení není vystaven kapacitní vazbě, protože země působí jako elektrostatická ochrana, tedy je stíněn zemí a přirozeně uzemněn. Kdežto sdělovací vedení instalované nad zemí tomuto vlivu podléhá a především v případě je-li od země izolováno.

Za těchto podmínek se může vlivem kapacitní vazby vytvořit nebezpečné nabíjecí napětí opět v řádech desítek až stovek voltů a to k rozdílnému potenciálu například zemi. Záměrně je uvedena zem, neboť zde lze obecně problémy s nebezpečným napětím snadno vyřešit stíněním sdělovacího kabelu s jeho následným uzemněním. [1]



Obr. 1.5 Kapacitní vazba [2]

1.3.3 Galvanický vliv

Galvanický vliv na sdělovací vedení nastává při poruchovém stavu na rozvodném systému, kdy při zkratu prochází zkratový proud postiženou fází přes stožár do země, případně zemnicím lanem zpět ke zdroji napájení. Za těchto podmínek dosahuje zkratový proud v poruchové fázi až 40násobek jmenovitého proudu, zatímco ve zbývajících fázích se přibližují k nule.

Vlivem toho se objeví na uzemnění stožáru přepětí, které v napětových hladinách vvn a zvn můžou dosahovat nezanedbatelných hodnot kterých je se nutno vyvarovat. Zde záleží především na vzdálenosti sdělovacího kabelu k uzemnění stožáru. [2]

1.4 Účinky vlivů

Důsledkem vlivů elektrického silového vedení na cizí kovové či elektrické části může být negativní chemická degradace materiálu např. potrubí (na principu elektrolýzy), a dále především vznik nežádoucího indukovaného napětí nazývané též dotykové. Nežádoucí hodnoty napětí popř. proudu mohou být podle síly účinku nebezpečné a tím i ohrožující okolí nebo mít jen rušivý účinek.

- **Nebezpečný vliv** – je vliv silového vedení na cizí části zařízení nebo vedení, při němž vznikají nebezpečné hodnoty napětí či proudu a ty mohou ohrozit pracovníky pracující na cizí části nebo vedení, popř. mohou nebezpečné napětí či proudy i zcela ohrozit elektronické zařízení sdělovací soustavy
- **Rušivý vliv** – ve většině případů jde o vliv silového vedení na cizí část, kdy jeho účinkem vznikají rušivá napětí a proudy vyšších harmonických síťové frekvence a např. ve sdělovacím vedení se tím zhoršuje kvalita přenášených signálů [1], [8]

2 Řešení vlivu třífázového vedení na sdělovací vedení

Aby bylo možné provést výpočet a zjistit hodnotu nebezpečného napětí indukovaného ve sdělovacím vedení, je nutné nejprve uvést danou fyzickou situaci. Těch může nastat pozičně nespočet, ať už jde jen o přiblížení obou soustav, o vzájemné křížení, tak jejich možné poziční kombinace. Musí být zohledněn i případný vzájemný úhel svírající obě osy vedení. Další zásadní věc, kterou je nutné znát, je způsob uložení obou soustav.

Proto je pro jednotlivé hladiny napětí silového vedení, stavu silového vedení a pro způsoby uložení obou soustav jiný rozsah požadovaných výpočtů nebezpečných vlivů, viz *Tab. 2.1*.

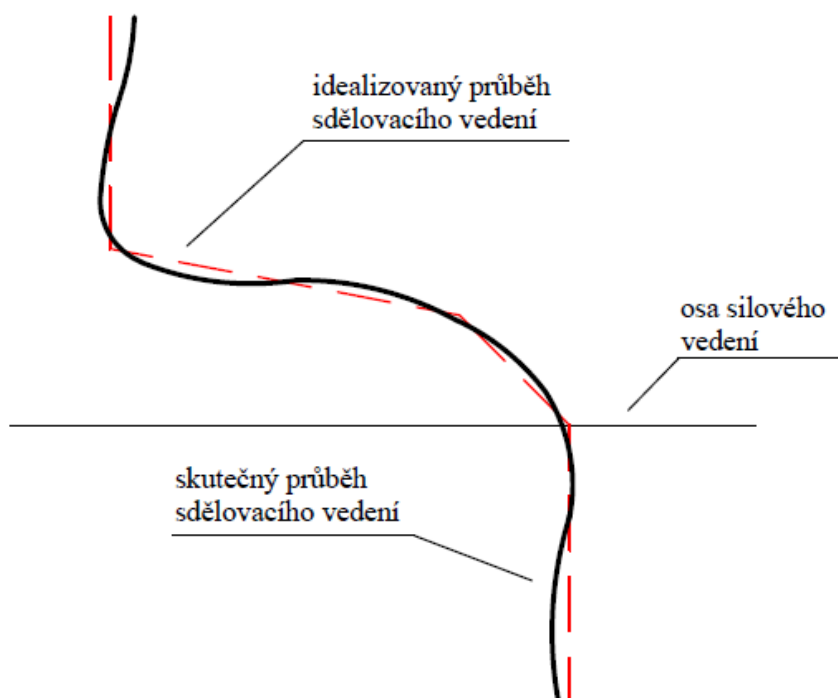
Tab. 2.1 Rozsah požadovaných výpočtů nebezpečných vlivů pro jednotlivý druh a typ vedení [8]

Druh trojfázového zařízení	Druh vedení	Stav silového zařízení	Nadzemní sděl. vedení bez kovových obalů	Nadzemní sděl. vedení s kovovým uzemněným obalem	Podzemní sděl. vedení
			vliv	vliv	vliv
Zařízení s izolovaným středním bodem, nebo se středním bodem spojeným se zemí přes indukčnost	vn venkovní	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	- kapacitní -	- - -	- - -
	vn kabelové	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	- - -	- - -	- - -
Zařízení se středním bodem spojeným se zemí přes činnou rezistenci	vn venkovní	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	- indukční -	- indukční -	- indukční -
	vn kabelové	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	- indukční -	- indukční -	- indukční -
Zařízení s účinně uzemněným středním bodem	vvv-zvn venkovní	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	kapacitní indukční -	- indukční -	- indukční galvanický -
	vvv-zvn kabelové	provozní stav zemní spojení trojfáz. zkrat	- indukční -	- indukční -	- indukční indukční

Na nižších hladinách sice také vznikají určité vzájemné vazby, které nevhodně působí na sdělovací vedení, ale jejich velikosti jsou nepatrné a tím pádem zanedbatelné. Tudíž se následující text bude věnovat pouze zmiňovaným hladinám vvn a zvn.

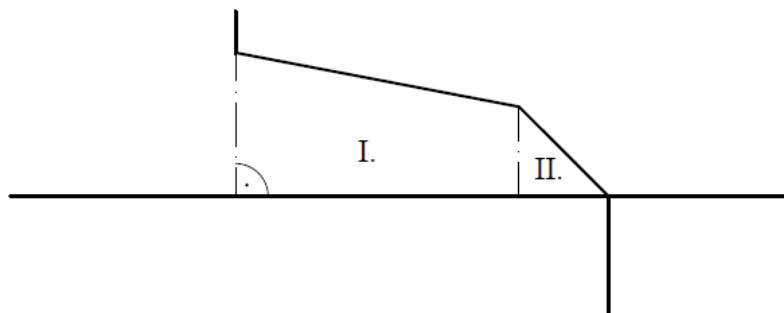
2.1 Zjištění měrných parametrů výpočetních úseků

Pro následující teoretický příklad byl vybrán obecný souběh a následné křížení sdělovacího vedení se silovým vedením. V realitě je sdělovací vedení uloženo velmi členitě a pro výpočet je nutné si jeho průběh zidealizovat, což je vidět na *Obr. 2.1*.



Obr. 2.1 Skutečný a zidealizovaný průběh sdělovacího vedení k ose silového vedení

Zidealizovaný průběh sdělovacího kabelu je nutné rozdělit na několik výpočetních úseků. Pro jeden celý výpočetní úsek musí být stejné podmínky, ať už jde o měrný odpor půdy, výsledné redukční činitel kabelu, zemnicích lan atd.



Obr. 2.2 Rozdělení zidealizovaného průběhu na výpočetní úseky

Výpočet vlivů pro šikmý souběh vedení (výpočetní úsek I.) se provádí jako pro rovnoběžný úsek, pouze s tím rozdílem, že se vypočítá ekvivalentní šířka souběhu z krajních šířek výpočtového úseku, dle vztahu (2.1)

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (2.1)$$

U ekvivalentní šířky musí být ovšem splněna podmínka (2.2). Není-li splněna je nutné výpočtový úsek rozdělit na kratší, které už dané podmínce vyhoví.

$$\frac{1}{2} \leq \frac{a_1}{a_2} \leq 2 \quad (2.2)$$

Při křížení silového a sdělovacího vedení se výpočtový úsek rozdělí na dva samostatné šikmé úseky (výpočetní úseky II. a III.), přičemž dělicí bod je bod, kde se kříží osy obou vedení. Šířka úseku v místě křížení vedení je v podstatě vzdálenost silového vodiče od země a_0 . Zde se dosazuje průměrná hodnota vzdálenosti, jenž je dána vrcholem uchycení vodiče k izolátoru a maximálním středovým průhybem vodiče mezi stožáry. Koncová šířka výpočtového úseku a' se vypočítá pomocí vzorce

$$a' = \sqrt{a_0^2 + a_2^2} \quad (2.3)$$

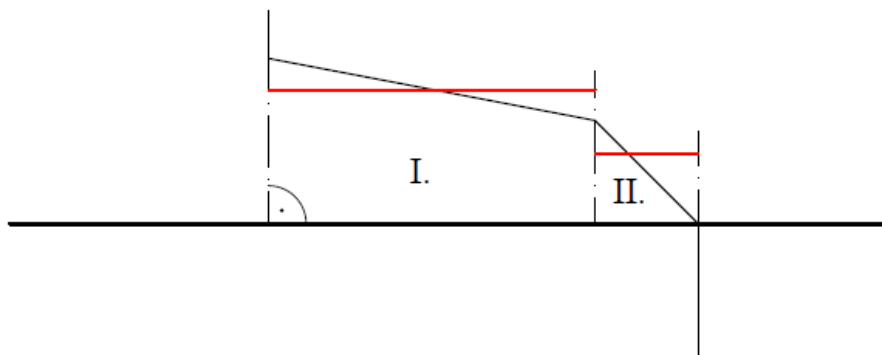
při splnění podmínky

$$a_2 \leq 3 \cdot a_0 \quad (2.4)$$

Je-li pozemní šířka výpočtového úseku a_2 větší než určuje podmínka (2.4), pak se koncová šířka úseku vedení a' bude rovnat pozemní šířce výpočtového úseku a_2 a výpočtový úsek se poté určuje jako souběhový úsek u něhož platí podmínka (2.2). [8]

Pro všechny šířky a délky možných výpočtových úseků je v přílohách (Příloha A) uvedena názorná prostorová grafická ukázka.

Po výpočtu všech ekvivalentních šířek jednotlivých výpočtových úseků je možné si pro názornost zobrazit půdorys celého počítaného úseku. Červenou barvou jsou znázorněny právě ekvivalentní šířky všech výpočtových úseků.



Obr. 2.3 Vykreslení ekvivalentních šířek pro dané výpočetní úseky

Protože se budu v této práci zabývat vlivem nebezpečného indukovaného napětí vzdušné přenosové soustavy zvn na sdělovací vedení, konkrétně na kabel uložený v zemi, budu se dále už jen věnovat této situaci.

Zařízení přenosové soustavy zvn má přímo uzemněný střední bod, a jestliže je sdělovací kabel uložen v zemi, bude se počítat dle Tab. 2.1 indukční a galvanický vliv při mimořádném stavu, tedy jednofázovém zkratu. Kapacitní vliv mezi sdělovacím kabelem a půdou je nepatrný, vlivem zemního odporu. Proto se zde kapacitní vliv silového vedení neuvažuje.

2.2 Výpočet indukčního vlivu

Nebezpečný indukční vliv, který vytváří zkratový proud ve fázovém vodiči silového vedení působí do svého okolí. Ovšem se zvyšující se šířkou od vodiče exponenciálně klesá v závislosti na zemním odporu ρ . Oblast působení na sdělovací kabel uložený v zemi sahá do vzájemné vzdálenosti obou vedení a'' podle vztahu

$$a'' = 300 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2.5)$$

Vypočet indukovaného napětí ve sdělovacím kabelu vyvolaný jednofázovým zkratem se určí pomocí výrazu [8]

$$U_i = \pi \cdot \omega' \cdot I_k \sum_{j=1}^n r_v \cdot M_i \cdot l_i \cdot 10^{-4} \quad (2.6)$$

Při odmyslení činitele současnosti a redukčních činitelů, které pozměňují situační stav v době výpočtu, je možno říct, že vzorec (2.6) pro indukované napětí vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce. [8]

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot S \cdot \cos \omega t) = -B \cdot S \cdot \frac{d}{dt}(\cos \omega t) = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t \quad (2.7)$$

2.2.1 Činitel současnosti

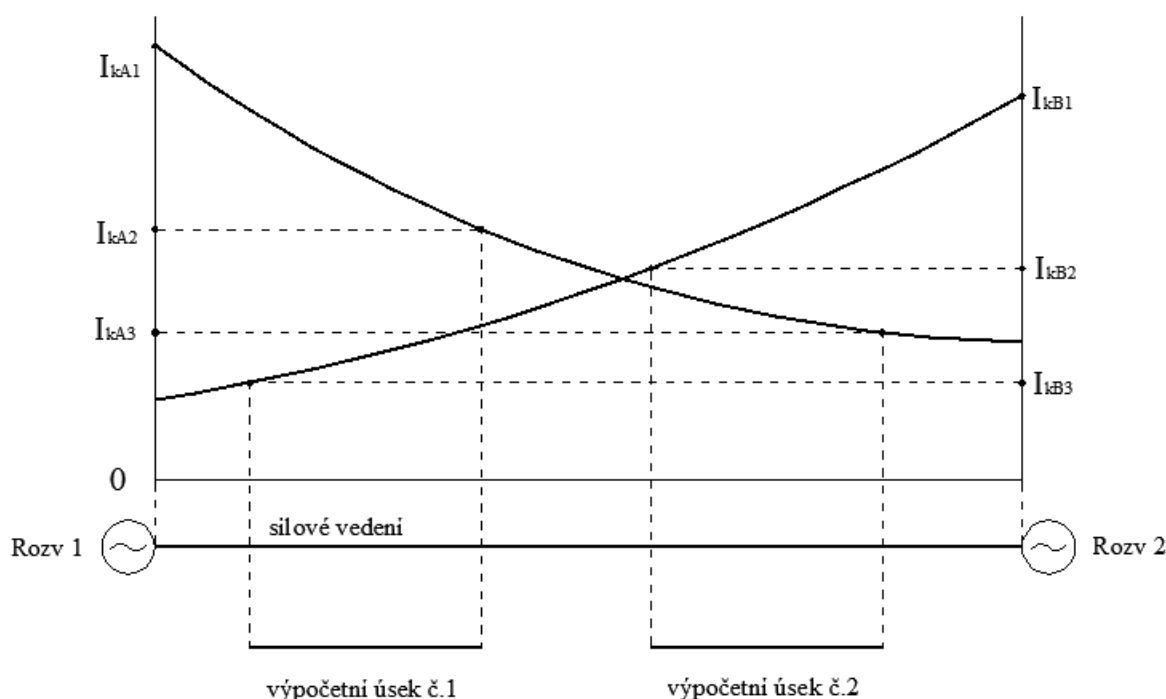
Činitel současnosti ω' vyjadřuje při výpočtu nebezpečných indukčních vlivů vliv zatížení sítě, vliv provozovaných jednotek v elektrárnách, vliv polohy zkratu a způsob zapojení soustavy. Jedná se tedy o součin činitelů zahrnující vlivy z ovlivňující strany tedy silového vedení. S činitelem současnosti ω' je vhodné počítat jen u nebezpečných krátkodobých indukčních a galvanických vlivů při jednofázovém zkratu u trojfázových venkovních vedení. Dle normy ČSN 33 2160 se k výpočtu připouští použít hodnotu [8]

$$\omega' = 0,7 \quad (2.8)$$

2.2.2 Zkratový proud

Dalším parametrem pro výpočet induktivního vlivu třífázových vedení na sdělovací vedení je zkratový proud I_k , tedy poruchový proud protékající silovým vedením v době zkratu. Při výpočtu se předpokládá, že jednofázový zkrat vedení s přímo uzemněným uzlem nastane na nejnepríznivějším místě vzhledem k sdělovacímu vedení. U nejhorší možné situace, tedy rovnoběžný souběh obou vedení, je tímto místem průmět začátku nebo konce sdělovacího vedení na osu trojfázového vedení.

Jednofázový zkratový proud se počítá podle normy ČSN EN 60909-0. Pro výpočet nebezpečného indukčního vlivu se uvažuje ustálená trojnásobná nulová složka jednofázového zkratového proudu $3 \cdot I_0$.



Obr. 2.4 Průběh zkratového proudu trojfázovým silovým vedením [8]

Na Obr. 2.4 je názorně vidět souběh sdělovacích vedení k oboustranně napájené silové soustavě. Při výpočtu se uvažuje maximální hodnota proudu, která může procházet paralelně k nejvzdálenějšímu konci výpočetního úseku sdělovacího vedení. Dále jen nutno zohlednit i druh napájení silové trojfázové soustavy, která může být napájena jednostranně nebo oboustranně. Tedy pro výpočetní úsek č.1 se uvažuje hodnota zkratového proudu I_{kA2} a pro výpočetní úsek č.2 hodnota zkratového proudu I_{kB2} . Případně je-li napájení jednostranné, tak například pro výpočetní úsek č.2 se odečítá hodnota zkratového proudu I_{kA3} .

Průběh jednofázového zkratového proudu trojfázového vedení musí mít vypracován vlastník a provozovatel trojfázového vedení, pro případ možného vyžádání projektantem sdělovacího vedení. [8], [10]

2.2.3 Vzájemná indukčnost

Příčinou vzniku napětí ve sdělovacím vedení je induktivní vazba mezi silovým vodičem a právě sdělovacím vedením, v tomto případě kabelem. Průchodem proudu v silovém vodiči dochází k vzniku magnetického pole, jehož intenzita je dána velikostí procházejícího proudu. Bude-li se nacházet v takto vytvořeném magnetickém poli jiná vodivá část, v tomto případě sdělovací kabel, začne mezi oběma vedeními procházet magnetický (indukční) tok Φ . Pro indukční tok platí

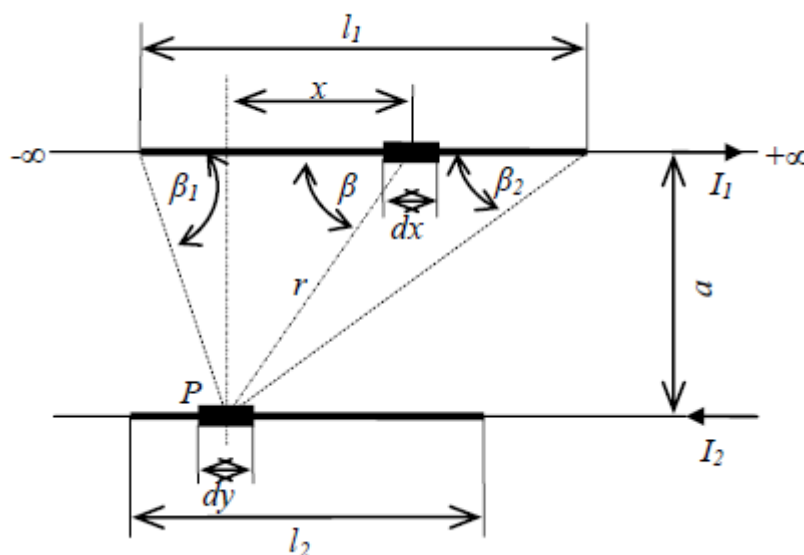
$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \text{rot } \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.9)$$

Vyjádřením magnetické indukce B a dosazením vztahu pro vektorový potenciál se dosáhne Biotova-Savartova zákona

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} = \frac{\mu \cdot I}{4\pi} \oint \text{rot} \frac{d\mathbf{l}}{r} = \frac{\mu \cdot I}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (2.10)$$

Z Biotova-Savartova zákona je možné stanovit všechny příspěvky magnetické indukce každého elementu dx vodiče, kterým protéká proud I , jenž vytvoří v elementu ovlivněného vodiče dy magnetické pole.

Vektor r svírá se směrem elementu dx úhel β , v tomto případě dvou přímých vodičů se směrem vodiče a proudem I_1 . Celková magnetická indukce v místě P je potom součet příspěvků všech elementů nacházejících se na vodiči l_1 od β_1 do β_2 .



Obr. 2.5 Grafické zobrazení situace

Převedením Biotova-Savartova zákona do skalární formy a dosazením vyjádřených proměnných mezi

$$dB_y = \frac{\mu \cdot I_1}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin \beta}{r^2} dx \quad (2.11)$$

Ze známých veličin se vyjádří vektor r a element dx pomocí proměnné β

$$\sin \beta = \frac{a}{r}; r = \frac{a}{\sin \beta}; \tan \beta = \frac{a}{x}; x = a \cdot \cot \beta; dx = -\frac{a}{\sin^2 \beta} d\beta \quad (2.12)$$

Následná velikost indukce B_y po dosazení do vzorce z libovolného místa od proudového vodiče I_1 a následným matematickým upravením

$$B_y = \frac{\mu \cdot I_1}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin^2 \beta}{a^2} \frac{a}{\sin^2 \beta} \sin \beta d\beta = \frac{\mu \cdot I_1}{4\pi \cdot a} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta = \frac{\mu \cdot I_1}{4\pi \cdot a} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (2.13)$$

Dosaženým vztahem (2.13) je možné určit velikost magnetické indukce v obecném bodě P v okolí proudového vodiče konečné délky l_1 . Jelikož pro náš případ, kdy pro výpočetní úsek se silové vedení jeví téměř nekonečnou délkou, bude rozsah mezních úhlů $\beta_1 = 0^\circ$ a $\beta_2 = 180^\circ$, čímž se dosáhne známého vztahu

$$B_y = \frac{\mu \cdot I_1}{2\pi \cdot a} \quad (2.14)$$

Vztah pro výsledný magnetický tok vyvolaný proudem I_l , který ve sdělovacím vedení o délce l indukuje napětí, platí při zanedbání reálných poloměrů obou vodičů oproti jiným vzdálenostem

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}_y \cdot d\mathbf{S} = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot l}{4 \cdot \pi} \cdot \ln a = M \cdot I_1 \cdot l \quad (2.15)$$

Následným vyjádřením se dosáhne hledaného vztahu pro vzájemnou indukčnost M mezi proudovým vodičem a ovlivněným vodičem. Pro M tedy platí [3], [11]

$$M = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \vec{a} \quad (2.16)$$

Vzájemná indukčnost M mezi dvěma jednovodičovými okruhy, v konkrétním případě mezi silovým vodičem a sdělovacím kabelem, závisí na ekvivalentní šířce výpočetního úseku a a dále na zdánlivém zemním odporu ρ , relativní permeabilita $\mu_r = 1$. Pro následné výpočty je nutné zjistit výpočetní parametr x , který se určí pomocí vzorce [8]

$$x = 0,00281 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (2.17)$$

Vzorce pro výpočet hodnot vzájemné indukčnosti uvedené níže platí pro velmi přesné výpočty pro konkrétně stanovený rozsah výpočetního parametru x

Pro hodnoty parametru $x \leq 0,1$ platí pro indukčnost M , v $\mu\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$

$$M = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \left(2 \ln \frac{2}{q \cdot a \cdot \alpha} + 1 - j \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^9 \quad (2.18)$$

Pro hodnoty parametru $0,1 < x \leq 0,25$ platí

$$M = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \left(2 \ln \frac{2}{q \cdot a \cdot \alpha} + 1 \right) \cdot 10^9 + j \cdot \left(-\frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10^9 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot a \cdot \alpha \cdot (b + c) \right) \right) \quad (2.19)$$

Pro hodnoty parametru $0,25 < x \leq 10$ platí

$$\begin{aligned} |M| &= 142,5 + 45,96 \cdot x' - 1,413 \cdot x'^2 - 198,4 \cdot \ln x' \\ \text{Re}(M) &= 123,36 - 1,69 \cdot x' + 23,937 \cdot x'^2 - 4,9614 \cdot x'^3 + 0,44212 \cdot x'^4 \\ &\quad - 0,01526 \cdot x'^5 + 0,001215 \cdot e^{x'} - 200 \cdot \ln x' \\ \text{Im}(M) &= -339 + 193,67 \cdot x' - 49,77 \cdot x'^2 - 6,979 \cdot x'^3 - 0,5243 \cdot x'^4 \\ &\quad + 0,01672 \cdot x'^5 + 180,42 \cdot e^{-x'} - 0,00146 \cdot e^{x'} - 0,274 \\ &\quad \cdot \ln x' \end{aligned} \quad (2.20)$$

Pro hodnoty výpočetního parametru $7 < x \leq 10$ je možné počítat a uvažovat pouze imaginární složku vzájemné indukčnosti. [8]

V případě pro méně přesné nebo pouze orientační výpočty vlivů, je možné hodnotu vzájemné indukčnosti určit z tabulky (Příloha C – tab. č. VIII.)

2.2.4 Výsledný redukční činitel

Redukční činitel r_v je hodnota, která snižuje výslednou velikost magnetické indukce mezi ovlivňujícím a ovlivňovaným vedením. Počítá se vždy pro nebezpečný indukční vliv u souběžných oboustranně uzemněných vodičů jako součin celkového redukčního činitele trojfázového vedení r_e a celkového redukčního činitele sdělovacího vedení r_s

$$r_v = r_e \cdot r_s \quad (2.21)$$

Celkový redukční činitel trojfázového vedení

V celé délce silového vedení je nutné vést zemnicí lana. Pokud by vedení nemělo zemnicí lana, procházel by při jednofázovém zkratu celý poruchový proud zemí zpět ke zdroji a tím by velikost magnetické indukce byla největší.

Celkový redukční činitel trojfázového vedení r_e se vypočítá pomocí vztahu

$$r_e = \frac{I_Z}{I_K} = \frac{I_K - \sum_{i=1}^n I_i}{I_K} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_K} = r_z \quad (2.22)$$

Při výpočtu celkového redukčního činitele na straně trojfázového vedení se smí počítat pouze s těmi souběžnými vodiči, které jsou připojeny na obou stranách k uzemňovacím soustavám trojfázového vedení. V realitě jde především o zemnicí lano případně lana.

Hodnota celkového redukčního činitele na straně trojfázového vedení se zjišťuje buďto výpočtem z obecné soustavy rovnic, kdy je na straně trojfázového vedení skupina kompenzačních vodičů, nebo měřením rozložených proudů v reálných podmínkách. Hodnota také závisí na materiálu zemního lana a rezistivitě půdy.

V přílohách (Příloha B – tab. č. I.) jsou uvedeny redukční činitele nejčastějších typů zemnicích lan vedení vvn a zvn.

Nachází-li se v blízkosti trojfázového vedení další souběžné trojfázové vedení, které má taktéž zemnicí lana připojena na obou stranách k uzemňovacím soustavám, určí se výsledný redukční činitel výpočtem dle vzorce

$$r_z = r_{zi} \cdot \sqrt{r_{z1} \cdot r_{z2}} \quad (2.23)$$

Celkový redukční činitel sdělovacího vedení

K dalšímu zeslabení indukce může dojít na straně ovlivňovaného vedení, jejich stínění buď vodivými kovovými plášti či obaly, nebo souběžně položenými vodiči. Podmínkou zeslabení indukce je, že stínící pláště a vodiče jsou na obou koncích uzemněny nebo propojeny tak, aby jimi mohl procházet naindukovaný proud.

Celkový redukční činitel sdělovacího vedení r_s se vypočítá pomocí vztahu (2.24), jako poměr naindukovaného napětí ve sdělovacím vedení s kompenzačními vodiči U_{rkom} ku naindukovanému napětí bez jakékoliv kompenzace U_r .

$$r_s = \frac{U_{rkom}}{U_r} \quad (2.24)$$

Celkový redukční činitel r_s může být taktéž stanoven i z dílčích redukčních činitelů, pomocí vzorce

$$r_s = r'_s \cdot r_t \cdot r_k \quad (2.25)$$

Kokrétní hodnota celkového redukčního činitele na straně sdělovacího vedení se zjišťuje, buďto výpočtem z obecné soustavy rovnic, kdy je na straně sdělovacího vedení skupina různých kompenzačních vodičů, nebo níže uvedenými vzorci, kdy na straně sdělovacího vedení jen pouze jeden kompenzační vodič.

- **Redukční činitel sdělovacích kabelů**

V redukčním činiteli sdělovacího kabelu r'_s jsou zahrnuty činitele kovového obalu a stínění, pláště a pancířové ochrany sdělovacího kabelu. V dnešní době se používají nejčastěji sdělovací kabely metalické, optické nebo koaxiální. K výpočtu redukčního činitele se používají hodnoty zjištěné měřením nebo nejčastěji hodnoty udávané výrobcí sdělovacích kabelů.

Pro kabely, které mají ochranné pancéřování, je hodnota redukčního činitele závislá na hodnotě podélného napětí v kovovém obalu U'_i dle vztahu

$$U'_i = \frac{U_i}{l} \quad (2.26)$$

V přílohách (Příloha B – tab. II. – VII.) jsou uvedeny redukční činitele určitých typů používaných sdělovacích kabelů.

- **Redukční činitel kompenzačních vodičů**

Redukční činitel skupiny kompenzačních vodičů r_t se počítá, je-li v blízkosti do 1 m od sdělovacího vedení n rovnoběžných vodičů stejných nebo podobných vlastností, uzemněných minimálně na obou koncích uzemněními s minimálními odpory vůči vlastním impedancím. Tento redukční činitel r_t je dán vztahem

$$r_t = \left| 1 - \frac{n \cdot Z_{az}}{Z_a + (n - 1) \cdot Z_{az}} \right| \quad (2.27)$$

Kompenzační vodiče jsou nejčastěji tvořeny zemnicími pásy FeZn, které jsou umístěny v těsné blízkosti sdělovacího kabelu (většinou nad ním). Kompenzační vodiče, jejichž měrný podélný odpor je několikanásobně větší, než je měrný podélný odpor lze při výpočtu zanedbat. Proto se v některých případech v určitých úsecích kompenzační vodiče vodivě propojí se stíněním kabelu.

• **Redukční činitel železničních kolejnic**

V případě, že se sdělovací vedení dostane do blízkého souběhu s železničními kolejemi do vzdálenosti maximálně 20 m při měrném odporu půdy $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$, je nutné uvažovat redukční činitel železničních kolejnic r_k . Zde ovšem taky záleží, zda je železnice elektrizovaná především v kvalitě elektricky vodivostních spojů kolejnic a dále taky počet kolejových tratí v úseku. [8]

Tab. 2.2 Redukční činitel při vzdálenosti sdělovacího vedení do 20 m od kolejnic [8]

Neelektrizovaná železnice (kolejnice špatně elektricky spojeny)	Jednokolejná	0,92
	Dvoukolejná	0,8
Elektrizovaná železnice (kolejnice dobře elektricky spojeny)	Jednokolejná	0,7
	Dvoukolejná	0,5

2.3 Výpočet galvanického vlivu

Galvanický vliv se posuzuje pouze u vzdušných vedení vvn, případně zvn. Rozlišuje se, zda se jedná o přiblížení sdělovacího vedení k uzemnění elektrické stanice (např. transformovny či stožáru silového vedení) nebo ukončení sdělovacího kabelu do elektrické stanice. V tomto případě bude rozebrána situace přiblížení sdělovacího kabelu k stožáru silového vedení.

Při nebezpečném galvanickém vlivu je namáhána obvodová izolace sdělovacího kabelu v blízkosti uzemnění stožáru při jednofázovém zkratu trojfázového vedení. Zde pochopitelně záleží na materiálu a počtu zemnicích lan silového vedení a dále na impedanci stožáru a na vzdálenosti sdělovacího kabelu od uzemnění stožáru.

Nebezpečný galvanický vliv se počítá, nachází-li se uzemnění sdělovacího vedení k uzemnění stožáru silového vedení blíže než 40 m. Pokud ano, počítá se podle vzorce

$$U = \frac{2 \cdot I_z \cdot Z_k \cdot r_g \cdot \omega' \cdot a}{\pi \cdot r} \quad (2.28)$$

kde: I_z ... část zkratového proudu, pro stožáry silového vedení vvn a zvn závisí na druhu a počtu zemnicích lan v daném místě

- bez zemnicího lana 100% I_z
- s jedním ocelovým lanem 50% I_z
- s dvěma ocelovými lany 40% I_z
- s jedním ocelohliníkovým lanem . 30% I_z
- s dvěma ocelohliníkovými lany ... 20% I_z

Z_k ... vstupní impedance uzemnění stožáru, pro vedení bez zemnicích lan se dosadí hodnota rezistence uzemnění stožáru, v Ω

r_g ... redukční činitel kovových obalů sdělovacího kabelu při galvanickém vlivu

a ... vzdálenost části zemniče nejvzdálenější od středu stožáru, v m

r ... vzdálenost kabelu od stožáru, v m

U stožárů trojfázového vedení v_{vn} a v_{zn} se vstupní impedance Z_k určí pomocí vzorce

$$Z_k = \left| \frac{1}{\frac{1}{R_{st}} + \frac{1}{Z_{kp}} + \frac{1}{Z_{kl}}} \right| \quad (2.29)$$

kde: R_{st} ... rezistence uzemnění stožáru, v Ω

Z_{kp} ... vstupní impedance řetězce zemní lano – stožár – zem zprava, v Ω

Z_{kl} ... vstupní impedance řetězce zemní lano – stožár – zem zleva, v Ω

Případné ochranné opatření se neprovádí, pokud je vzdálenost mezi uzemněním stožáru silového vedení od sdělovacího kabelu větší než 20 m. Pokud má sdělovací kabel např. ochrannou plastovou chráničku jako vnější izolaci ke zvýšení elektrické pevnosti, posouvá se hranice, kdy se výpočet neprovádí, k 2 m od nejvzdálenější části zemnění stožáru silového vedení. [8]

2.4 Meze nebezpečných induktivních a galvanických vlivů

Hodnota napětí U_i , které se naindukuje ve sdělovacím vedení při jednofázovém zkratu silového vedení s přímo uzemněným středním bodem, nesmí překročit u kabelových vedení hodnotu zkušební napětí pro zkoušku elektrické pevnosti obvodové izolace kabelu. U kabelových vedení bez oddělovacích transformátorů je nutno současně kontrolovat, zda nepřekračuje indukované podélné napětí zkušební napětí přirozených zařízení proti zemi.

Tab. 2.3 Hodnoty mezí nebezpečného indukovaného napětí pro indukční a galvanický vliv [8]

Doba trvání zkratu, v s	Mez nebezpečného indukovaného napětí, ve V
do 0,3	300
0,4	260
0,5	230
0,6	210
0,7	190
0,8	180
0,9	170
1	160

V případě, že hodnota indukovaného podélného napětí ve sdělovacím kabelovém vedení přesahuje meze podle tabulky Tab. 2.3, je nutné veškerá připojená sdělovací zařízení až k oddělovacím transformátorům opatřit ochranou před nebezpečným dotykem, jakož i výstrahou (např. výstražnou tabulkou).

Dovolené meze U_{dov} indukčních vlivů pro kabelové vedení s dálkovým napájením se stanoví:

- Pro systém dálkového napájení vodič – vodič bez uzemněného bodu v napájecím obvodu pro stejnosměrný a střídavý proud

$$U_{dov} = U_z \quad (2.30)$$

- Pro systém vodič – vodič napájený střídavým proudem s uzemněným středem vinutí transformátoru

$$U_{dov} = U_z - \frac{U_n}{2} \quad (2.31)$$

- Pro systém vodič – vodič napájený stejnosměrným proudem s uzemněným pólem zdroje

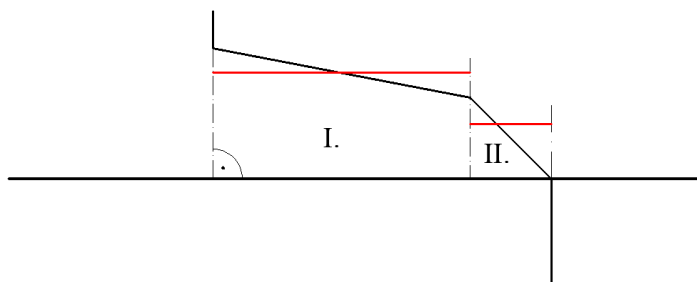
$$U_{dov} = U_z - \frac{U_n}{\sqrt{2}} \quad (2.32)$$

Kabelové vedení ohrožené galvanickým vlivem zkratových proudů v blízkosti stožáru silového vedení vvn, zvn nebo v blízkosti jiného uzemnění zařízení silového vedení vvn, zvn a místem s nulovým potenciálem nesmí překročit při zkratovém stavu trojfázového vedení meze uvedené v tabulce Tab. 2.3. Toto neplatí pro sdělovací vedení a zařízení na uzeměnicích vvn, zvn. [8]

2.5 Vzorový výpočet

2.5.1 Řešený manuálním postupem

Samotnému vzorovému výpočtu předchází grafické znázornění situace silového a kabelového vedení. Pro vzorový výpočet bude použita výše uvedená situace, kde je kabelové vedení rozděleno na dva výpočetní úseky



Obr. 2.6 Grafická situace výpočetních úseků pro vzorový výpočet

Postup výpočtu daný normou je pro všechny výpočetní úseky analogicky obdobný, proto bude následně pro ukázkou proveden vzorový výpočet výpočtového úseku I. vymezený krajními šířkami $a_1 - a_2$.

Ekvivalentní šířka výpočetního úseku, tedy vzájemná vzdálenost silového vedení a sdělovacího kabelu, je určena za pomoci krajních šířek, pro výpočet např. $a_1 = 100$ m a $a_2 = 66$ m

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{100 + 66}{2} = 83 \text{ m}$$

Činitel vzájemné indukčnosti

K následným výpočtům je potřeba mít zjištěné některé potřebné parametry. Jedním z nich je měrný zemní odpor ρ , pro výpočet bude uvažován $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$, a dále frekvence silového vedení $f = 50$ Hz.

Pro výpočet činitele vzájemné indukčnosti $|M|$ je nutné vypočítat početní parametr x dle vzorce (2.17).

$$x = 0,00281 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} = 0,00281 \cdot 83 \cdot \sqrt{\frac{50}{100}} = 0,16$$

Podle hodnoty početního parametru x , který je v rozsahu $0,1 < x \leq 0,25$, se určí výpočetní vzorec činitele vzájemné indukčnosti $|M|$, v tomto případě vzorec (2.19)

$$M = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \left(2 \ln \frac{2}{q \cdot a \cdot \alpha} + 1 \right) \cdot 10^9 + j \cdot \left(-\frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10^9 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot a \cdot \alpha \cdot (b + c) \right) \right)$$

Parametry b a c reprezentující vzdálenost silového a sdělovacího vedení od povrchu země, v podstatě charakterizují vzájemnou vzdálenost obou vedení v místě křížení. V tomto vzorovém příkladu bude brána hodnota $b = 20$ m a $c = -1,5$ m. Zápornou hodnotou se uvažuje uložení v zemi.

po dosazení hodnot

$$M = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi} \cdot \left(2 \ln \frac{2}{1,7811 \cdot 83 \cdot 0,00281 \cdot \sqrt{\frac{50}{100}}} + 1 \right) \cdot 10^9 + j \cdot \left(-\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 10^9 + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot 83 \cdot 0,00281 \cdot \sqrt{\frac{50}{100}} \cdot (20 + (-1,5)) \right) \right)$$

Výpočtem a matematickým zjednodušením vychází hodnota činitele vzájemné indukčnosti

$$|M| = 508 \mu H \cdot km^{-1}$$

Správnost vypočtené hodnoty je možné ověřit kontrolním porovnáním s tabulkovými hodnotami uvedenými v přílohách (Příloha C – tab. č. VIII).

Výpočet indukovaného napětí

Jelikož jde o vzorový výpočet, budou zvoleny další hodnoty potřebné pro zjištění indukovaného napětí. Délka výpočtového úseku bude zvolena $l = 200$ m, a dále je potřeba si zvolit hodnotu zkratového proudu tekoucí silovým vedením $I_k = 2000$ A. Celkový redukční činitel bude zde neuvažován a činí tedy $r_v = 1$.

Tímto jsou zjištěny všechny hodnoty pro výpočet a je možné dosadit do vzorce

$$U_i = \pi \cdot \omega' \cdot I_k \sum_{j=1}^n r_v \cdot M_i \cdot l_i \cdot 10^{-4} = \pi \cdot 0,7 \cdot 2000 \cdot 1 \cdot 508 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4}$$

Výsledné naindukované napětí ve výpočtovém úseku I.

$$U_i = 44,7 V$$

2.5.2 Řešený programem EMTP-ATP

Nyní bude vypočítán stejný vzorový příklad pomocí programu EMTP-ATP. V tomto programu je nutné si zjednodušeně namodelovat celou výpočetní situaci, tedy napájecí zdroj silového vedení a počítaný výpočetní úsek I., proto bude postupně rozebráno přesné nastavení těchto prvků. Hodnoty použité v manuálním výpočtu budou zde do modelovaných prvků vloženy a následně bude zkoumána výstupní hodnota napětí.

Zdroj napájení

Jedním z prvků simulace je zdroj napájení. Jelikož indukované napětí ve sdělovacím kabelu vytváří zkratový proud procházející v silovém vedení, tak jako zdroj bude zvolen zdroj proudu namodelován pomocí prvku ACSOURCE. Zadávanou hodnotu proudu je nutné snížit uvažováním činitele současnosti ω' , neboť ten nelze do simulace samostatně zavést (případně to platí i o celkovém redukčním činiteli r_v). U střídavého zdroje je nutné nastavit síťovou frekvenci $f = 50$ Hz.

Reálný třífázový zdroj je možné do simulace namodelovat pouze jako jednofázový. Je to dáno tím, že při jednofázovém zkratu prochází postiženou fází mnohem větší proud oproti zbylým dvěma fázím a jelikož jejich nízké hodnoty proudu nemají na simulovanou situaci žádný vliv, mohou být v simulaci zanedbány.

Component: ACSOURCE

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Ampere	1400
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	1	XX0001

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☒ Current ☐ Voltage

Num phases: ☒ Single ☐ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☐ Peak L-G ☒ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

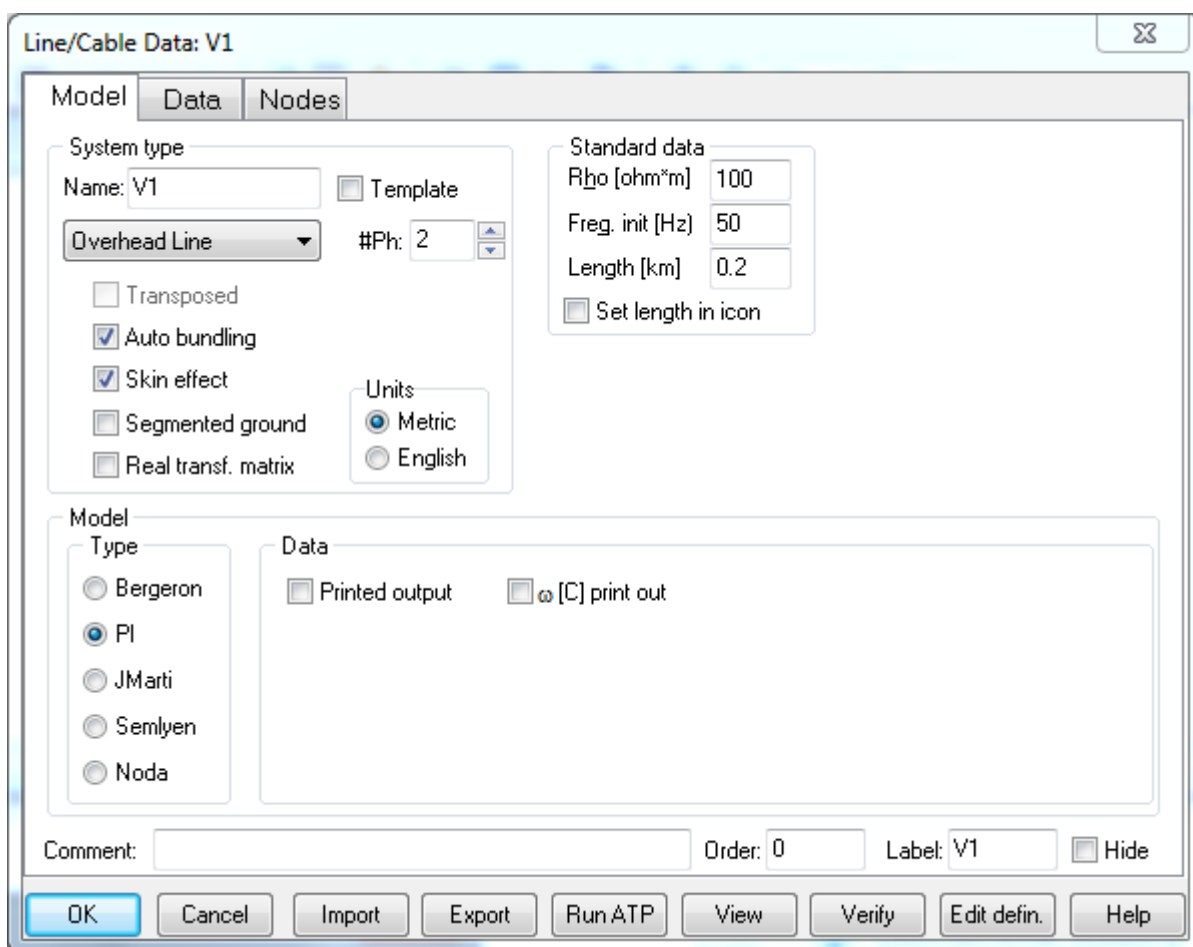
Edit definitions OK Cancel Help

Obr. 2.7 Karta nastavení zdroje napájení

Výpočetní úsek

Dalším prvkem je výpočetní úsek. Model výpočetního úseku lze v simulaci vytvořit pomocí prvku LCC template. Pomocí tohoto prvku je simulována poziční situace silového a sdělovacího vodiče. V kartě výpočetního úseku v záložce Model je možné nastavit délku výpočtového úseku l , která v tomto vzorovém příkladu je $l = 0,2$ km, zemní odpor $\rho = 100 \Omega \cdot m$ a síťovou frekvenci $f = 50$ Hz.

Jelikož není možné v jednom prvku nasimulovat vzdušný a zemní vodič dohromady, nastaví se dva vzdušné vodiče, protože dle teorie je známo, že pozice sdělovacího kabelu nad zemí nebo pod ní nemá na výpočet vliv.



Obr. 2.8 Karta nastavení výpočetního úseku – záložka Model

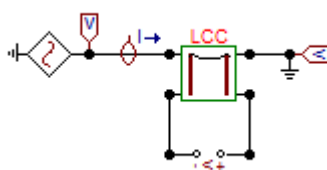
V záložce Data jsou dva řádky zastupující nastavení dvou vodičů. První vodič je vodič silového vedení, kde jsou nastaveny parametry vodiče a výška vodiče od země $V_{mid} = 22.5$ m. Druhý řádek je vodič sdělovacího kabelu, kde jsou nastaveny také parametry vodiče, výška vodiče nad zemí $V_{mid} = 1$ m a zásadní parametr $Horiz = 83$ m, pomocí něhož je nastavena vzdálenost sdělovacího vodiče od silového vodiče, tedy ekvivalentní šířka výpočtového úseku. V záložce View je možné si nastavené pozice vodičů vizuálně ověřit.

Line/Cable Data: V1

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0	2.98	0.065	0	22.5	22.5	0	0	1
2	2	0	0.04	300	83	0	1	0	0	1

Obr. 2.9 Karta nastavení výpočetního úseku – záložka Data

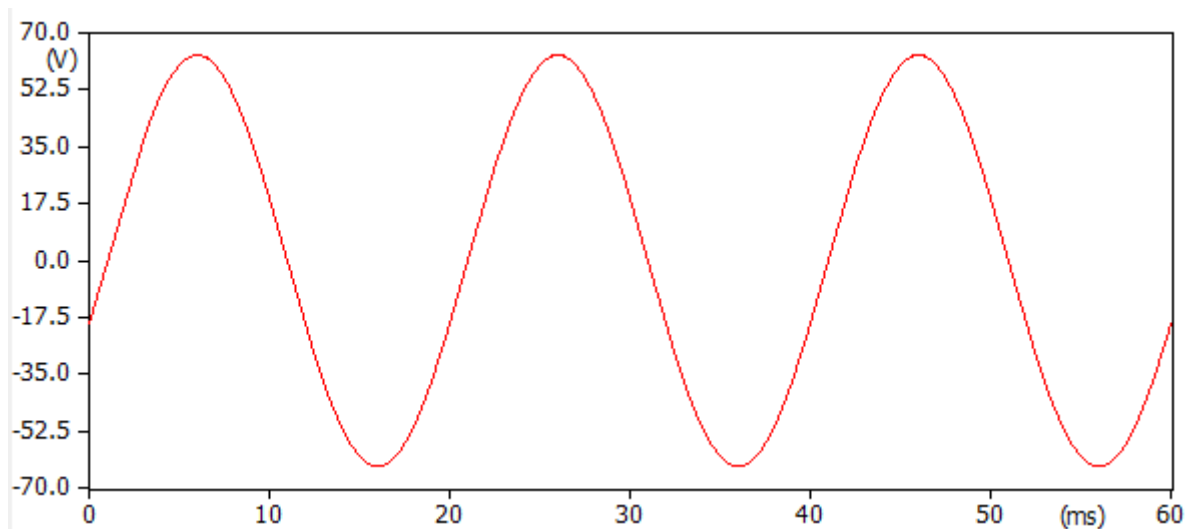
Sestavení modelu pro simulaci vzorového výpočtu



Obr. 2.10 Model simulace vzorového příkladu

Pomocí nastavených obvodových prvků je sestaven model simulující vzorový příklad výpočtu nebezpečného induktivního vlivu ve výpočetním úseku I. Tedy k napájecímu proudovému zdroji je připojen silový vodič, který je rozložen v prvku LCC. Konec silového vodiče je přímo uzemněn pro navození zkratové poruchy. Kabelové výstupy z LCC prvku jsou propojeny přes napěťovou sondu pro zjištění indukovaného napětí, vzniklé induktivním vlivem procházejícího zkratového proudu v namodelovaném silovém vedení.

Výstup simulace



Obr. 2.11 Graf průběhu indukovaného napětí v počítaném výpočetním úseku I.

Cílovým výstupem této simulace je grafický průběh naindukovaného napětí v počítaném výpočetním úseku I. Sinusový průběh tohoto napětí je dán frekvencí zkratového proudu v silovém vodiči. V tomto průběhu je pro řešenou situaci podstatná především efektivní hodnota napětí.

$$U_i = 44,7 \text{ V}$$

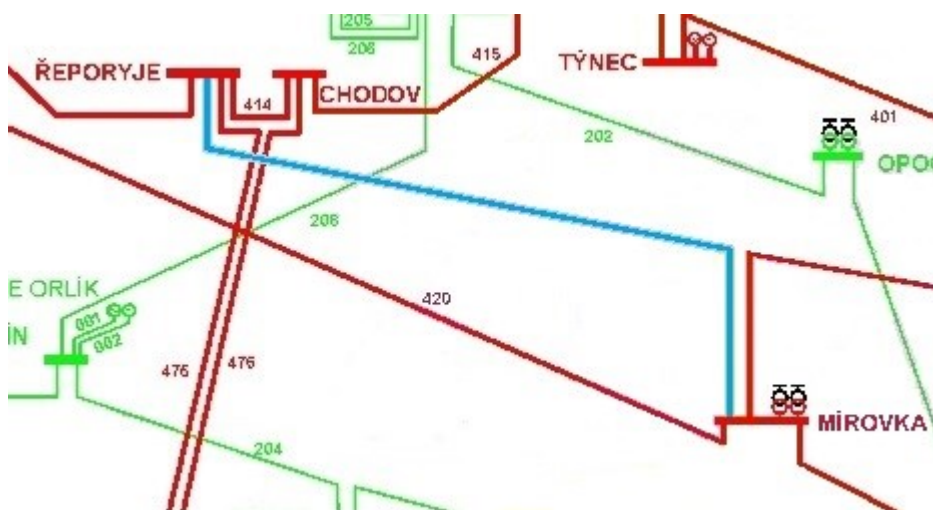
Tímto vzorovým příkladem bylo ověřeno možné použití programu EMTP-ATP k složitějším výpočtům reálných početních situací.

3 Analýza nebezpečného vlivu v reálné situaci

V této kapitole bude proveden výpočet nebezpečných vlivů projektovaného silového vedení přenosové soustavy V413 v úseku Řeporyje – Mírovka o celkové délce 146 km (v Obr. 3.1 zvýrazněna modře).

Aktuálně provozuje společnost ČEPS nejdelší trasu V413 Řeporyje – Prosenice, která je dlouhá 284 km. Vzhledem k budoucí realizaci rozšíření jaderné elektrárny Temelín a následným zvýšením efektivity spolehlivosti přenosové soustavy je vypracováván projekt rozdělení tohoto vedení s mezizaústěním do rozvodny Mírovka.

Většina trasy tohoto úseku bude vedena ve stávající trase V413 a v blízkosti rozvodny Mírovka dojde k odbočení. Změnou zapojení do celkové sítě přenosové soustavy se změní výkonové poměry v síti a taktéž i hodnoty zkratových proudů v této trase. Proto je nutné opět vypočítat nebezpečné vlivy pro celý úsek této trasy.



Obr. 3.1 Situační znázornění projektované trasy Řeporyje - Mírovka

3.1 Síť sdělovacích kabelových vedení

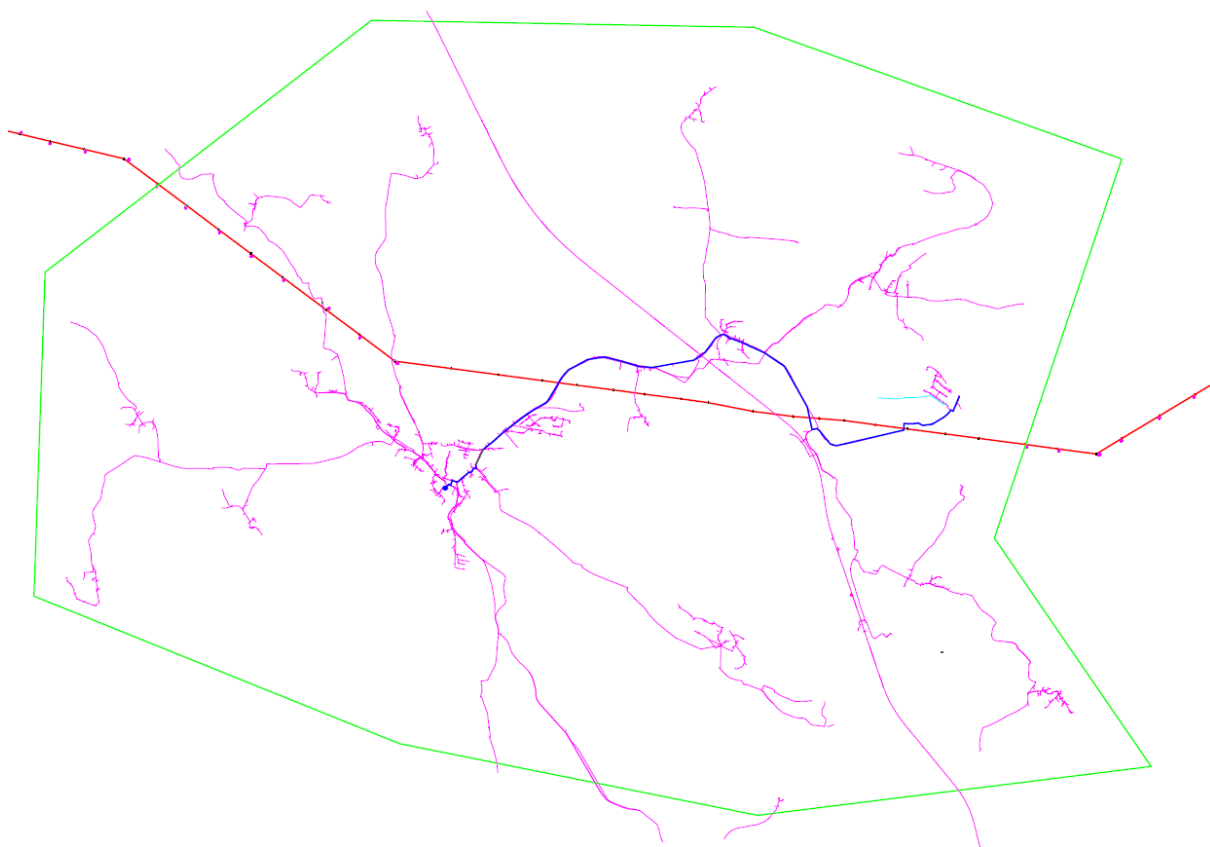
Pro výpočet je nutné taktéž znát síť telekomunikačních sdělovacích kabelů nacházející se v blízkosti silového vedení, na které může působit.

Telekomunikační síť v dnešní době je nezanedbatelnou součástí života. Pomocí ní je pro obyvatele poskytnuto internetové připojení, mobilní síť nebo televizní a hlasové služby. Aby byla zajištěna komunikace kohokoliv odkudkoliv, nachází se na celém území České republiky nespočet sdělovacích kabelových vedení. Ty mohou být tvořeny různými typy a druhy kabelů, ať už jde o metalické, koaxiální nebo dnes moderní optické. Druh sdělovacího kabelu, především jeho redukční činitel velice závisí na výsledné hodnotě nebezpečných vlivů.

Správcem telekomunikační sdělovací sítě v České republice je společnost CETIN, která vlastní a provozuje většinovou telekomunikační síť na našem území. Od společnosti ČEPS bylo získáno, pro potřeby následujícího výpočtu, schéma a zakres sdělovacích vedení pro předem vybrané zájmové území nacházející se v projektované trase vedení V413. Pro možné zneužití důvěrných materiálů, nebude zde uváděna přesná lokalita zájmového území (nebudou uvedeny názvy měst a obcí).

Vybrané zájmové území určené pro výpočet o ploše cca 65 km² zahrnuje menší obec na hranici Středočeského kraje. V obci se nachází telefonní ústředna dotčené telekomunikační společnosti. Tato společnost zde provozuje místní telekomunikační síť s účastníky v dané obci a sousedních obcích v okruhu 5 km. Síť je tvořena nadzemními a podzemními sdělovacími kabely, v části území jsou instalovány kabely dielektrické či dielektrické s metalickými vyhledávacími prvky, zbývající část sítě je tvořena metalickými sdělovacími kabely.

Přesné typy použitých kabelů a jejich teritoriální přiřazení k dané ústředně jsou uvedeny v souboru společnosti ČEPS Invest. Tento soubor není možné uveřejnit, jelikož jde o velice důvěrná data.



Obr. 3.2 Náhled celé výpočetní situace

Na Obr. 3.2 je vyobrazen náhled celé situace, kde část projektované trasy silového vedení (vyznačena červenou barvou) prochází sítí sdělovacích kabelových vedení vybraného zájmového území. Z této sítě sdělovacích vedení je pro výpočet zvoleno podzemní metalické vedení (vyznačeno modrou barvou) tvořené jedním kabelem typu TCEPKPFLE 35x4x0,4 o délce 6,5 km (trasa: ústředna - nejzazší koncový účastník), u něhož dojde celkem k třem pozičním vzájemným křížením s trasou silového vedení.

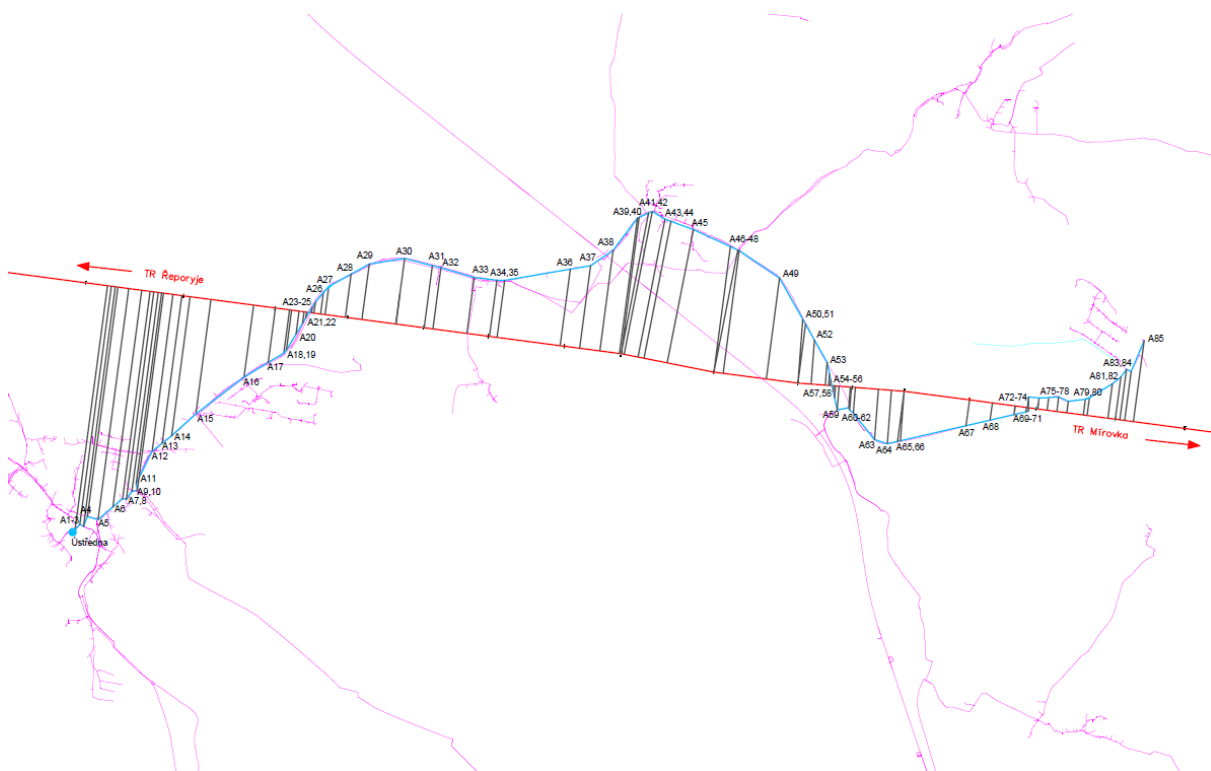
Obr. 3.2 slouží pouze k náhledu řešené situace, technický výkres s patřičným měřítkem je uveden v přílohách (Příloha F – výkres F-01).

3.2 Ekvivalentní šířky

Jak je vidět na Obr. 3.2, trasa kabelového vedení je velmi rozličná vůči silovému vedení. Proto je nutné si kabelovou trasu nepatrně zidealizovat a to tak, aby relativní chyba přesnosti od reálného průběhu nepřesahovala pět procent.

V takto nepatrně zjednodušeném průběhu sdělovacího kabelu se vytyčí krajní šířky výpočetních úseků A1 ÷ A85. Krajní šířka se volí vždy, když dojde k „zalomení“ zidealizovaného průběhu sdělovacího kabelu, zalomení silového vedení a dále při dovršení krajní hodnoty udávané podmínky (2.2), tedy půlnásobku či dvojnásobku hodnoty poměru krajních šířek. Při přibližování a následnému křížení sdělovacího kabelu je nutné určit přesnější krajní výpočetní šířku pomocí vzorce (2.3), zde se musí brát v úvahu průměrná výška silového vedení, která v tomto výpočtu činí 20 m od povrchu země.

Základní podmínkou při vytyčování krajních šířek je vytvořit co nejméně výpočetních úseků k co nejpresnějšímu průběhu kabelového vedení.

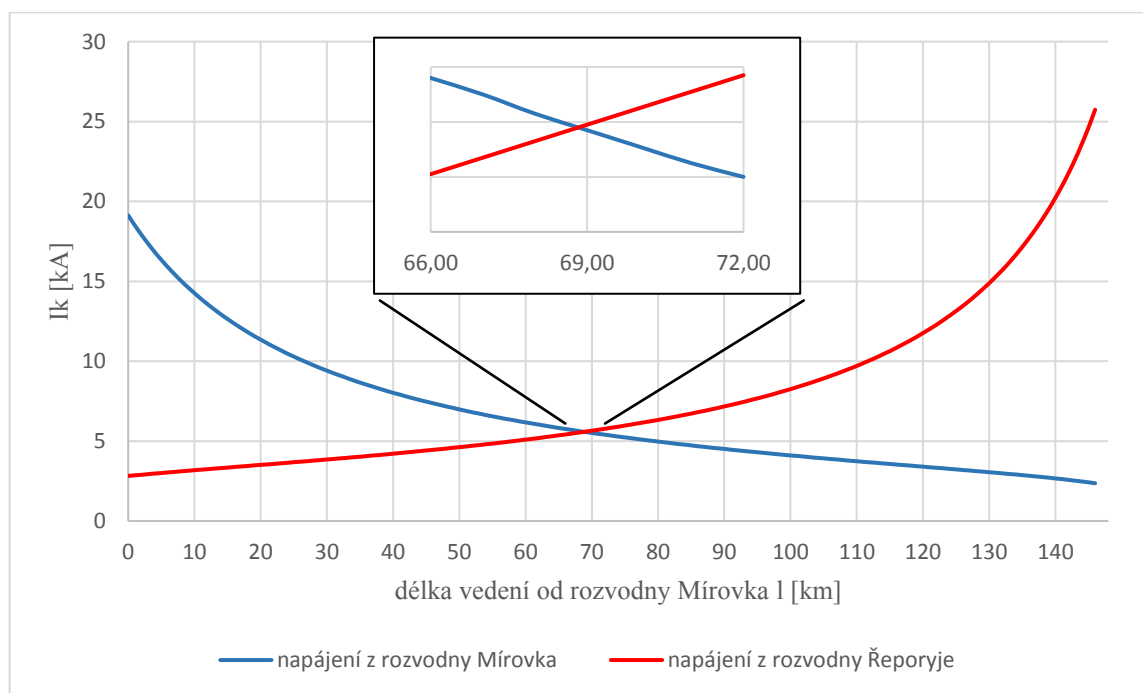


Obr. 3.3 Rozdělení počítaného kabelového vedení krajními šířkami

Na Obr. 3.3 jsou graficky vykresleny výpočetní úseky ohraničené svými krajními šířkami A1 ÷ A85 pro počítaný kabelový úsek. Veškeré grafické a měřicí práce jsou provedeny v prostředí programu AutoCAD. Určením vhodného měřítka lze pomocí tohoto programu velmi přesně odečíst délkové parametry potřebné k následnému výpočtu, a to velikosti koncových šířek výpočetních úseků a délek výpočetních úseků. Technický výkres situace s patřičným měřítkem je uveden v přílohách (Příloha F – výkres F-02).

3.3 Zkratové proudy

Pro výpočet induktivního vlivu třířázového vedení je nejnepríznivějším stavem v silovém vedení jednofázový zkrat, který navodí jednofázový zkratový proud I_k . Jelikož trasa silového vedení Řeporyje – Mírovka je vložena do stávající přenosové soustavy, může být napájení vedení oboustranné. Proto je nutné počítat se zkratovými proudy při napájení z rozvodny Mírovka a také z rozvodny Řeporyje. V grafu Obr. 3.4 lze vidět průběhy zkratových proudů, které se zvyšující se vzdáleností od dané rozvodny klesají. Přesné hodnoty zkratových proudů byly získány od provozovatele ČEPS.



Obr. 3.4 Graf průběhu proudů projektovaného vedení Řeporyje - Mírovka

Při výpočtu se předpokládá, že jednofázový zkrat vedení s přímo uzemněným uzlem nastane na nejnepríznivějším místě vzhledem k sdělovacímu vedení. Tímto nejnepríznivějším místem je vždy vzdálenější konec kabelové trasy vzhledem ke konkrétní napájecí rozvodně.

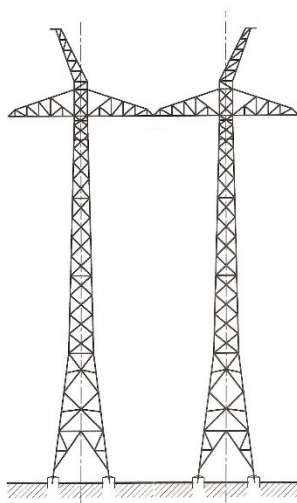
Kabelová trasa zvolena pro tento výpočet se nachází na 66,5 km až 71,5 km od rozvodny Mírovka, tedy zrovna v místě, kde se průběhy zkratových proudů kříží. Zde je proto nutné určit a odečíst správnou hodnotu proudu.

Pro 66,5 km silového vedení je odečtena hodnota z průběhu zkratového proudu z rozvodny Řeporyje $I_{k\text{ REP}} = 5449,3$ A, a pro 71,5 km hodnotu z průběhu zkratového proudu z rozvodny Mírovka $I_{k\text{ MÍR}} = 5431,6$ A. Logicky lze usoudit, že vyšší hodnota induktivního vlivu nastane při vyšší hodnotě zkratového proudu. K následujícímu výpočtu se tedy použije hodnota zkratového proudu $I_{k\text{ REP}} = 5449,3$ A.

3.4 Redukční činitel

3.4.1 Redukční činitel trojfázového vedení

Redukční činitel na straně ovlivňujícího vedení je dán použitým typem stožárů vedení a také počtem a typem použitých vodičů vedení. Projektované silové vedení přenosové soustavy napětové hladiny 400 kV bude tvořeno stožáry typu „portál“ (přesné parametry stožáru jsou uvedeny v příloze: Příloha D) a na těchto stožárech budou umístěny silové vodiče tvořené AlFe lany 3 x 450 AlFe 6, jenž jde o standartní typ používaný na této napětové hladině. Jako zemnicí lana jsou zvolena AlFe lana 2 x 185 AlFe 3 umístěné na vrcholech stožárů.



Obr. 3.5 Nosný stožár typ „portál“

Z tabulky uvedené v přílohách (Příloha B – tab. č. I) je pro rezistivitu půdy $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ a pro typizované rozložení silového vedení dané především typem stožárů a zemnicích lan odečtena hodnota $r_e = 0,487$.

3.4.2 Redukční činitel sdělovacího vedení

Redukční činitel na straně ovlivňovaného vedení, tedy na straně sdělovacího kabelu je určen použitým typem kabelu a jeho vlastnostmi. Redukční činitel je zásadně snižován přítomností armování a stínění hlavních žil sdělovacího vedení.

Zde počítané sdělovací vedení je po celém výpočetním úseku tvořeno pouze jedním typem kabelu a to TCEPKPFLE 35x4x0,4. Z tabulky (Příloha B – tab. č. VI) je možné vyčíst dle průměru kabelu, který v této situaci činí 35 mm, redukční činitel $r_s = 0,91$.

3.4.3 Celkový redukční činitel

Celkový redukční činitel je dán součinem dílčích redukčních činitelů silového vedení, kabelů a jejich vlastností a dále pak i situčními vlastnostmi okolního prostředí, mezi něž patří například vzájemné propojení stínění kabelů, blízkost kolejových cest atd.

$$r_v = r_e \cdot r_s$$

Každá takováto situační vlastnost vždy snižuje výslednou hodnotu počítaného nebezpečného vlivu. V případě výpočtu jakékoliv již provozované kabelové trasy se tyto vlastnosti neberou v úvahu, neboť jejich zjišťování by bylo velmi komplikované a taktéž i jejich zanesení do výpočtu. Proto se výsledný redukční činitel určí z redukčních činitelů silového vedení r_e a sdělovacího kabelu r_s .

$$r_v = 0,487 \cdot 0,91 = 0,443$$

3.5 Manuální výpočet nebezpečného vlivu

Manuálním postupem uvedeným v druhé kapitole se analogicky vypočítají jednotlivé výpočetní úseky počítaného kabelového úseku, jenž je rozdělen celkem na osmdesát výpočetních úseků.

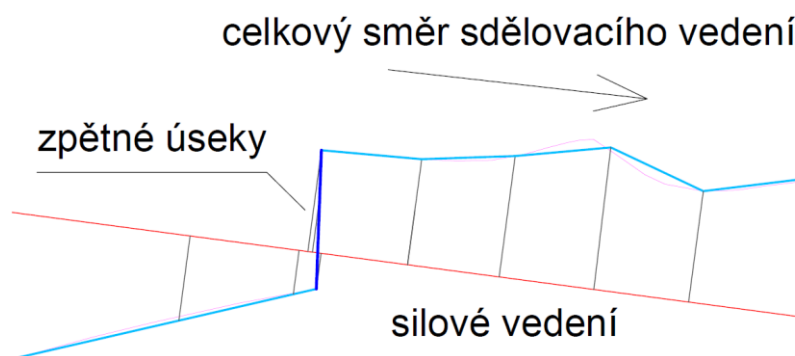
Pro každý výpočetní úsek jsou rozhodující měrné velikosti krajních šířek a délka výpočetního úseku, pomocí kterých se vypočítá hodnota indukovaného napětí. Ty jsou za pomoci programu AutoCAD odečteny a vloženy do programu MS Excel, ve kterém jsou provedeny veškeré počítací práce potřebné k zjištění indukovaného napětí každého výpočetního úseku. Všechny zjištěné a vypočtené hodnoty a parametry jsou uvedeny v tabulce (Příloha E). Pro její nadměrnou velikost je níže v textu uvedena tabulka *Tab. 3.1* pouze s uvedenými výslednými hodnotami indukovaného napětí v jednotlivých výpočetních úsecích.

Tab. 3.1 Vypočtené hodnoty indukovaných napětí v jednotlivých výpočetních úsecích

Výpočetní úsek	Označení výpočetního úseku	Indukované napětí v kabelovém úseku	Výpočetní úsek	Označení výpočetního úseku	Indukované napětí v kabelovém úseku	Výpočetní úsek	Označení výpočetního úseku	Indukované napětí v kabelovém úseku
		U_i [V]			U_i [V]			U_i [V]
1.	A1 - A2	0,76	31.	A31 - A32	6,00	61.	A64 - A66	9,64
2.	A2 - A3	0,78	32.	A32 - A33	24,13	62.	A65 - A67	58,66
3.	A3 - A4	0,52	33.	A33 - A34	16,39	63.	A67 - A68	26,39
4.	A4 - A5	2,26	34.	A34 - A35	5,66	64.	A68 - A69	31,38
5.	A5 - A6	2,83	35.	A35 - A36	40,38	65.	A69 - A70	18,27
6.	A6 - A7	1,94	36.	A36 - A37	11,32	66.	A70 - A71	3,98
7.	A7 - A8	0,91	37.	A37 - A38	10,66	67.	A71 - A72	-0,64
8.	A8 - A9	1,08	38.	A38 - A39	8,39	68.	A72 - A73	-0,95
9.	A9 - A10	1,33	39.	A39 - A40	0,58	69.	A73 - A74	-0,72
10.	A10 - A11	-0,50	40.	A41 - A42	1,14	70.	A74 - A75	14,92
11.	A11 - A12	3,34	41.	A42 - A43	5,04	71.	A75 - A76	13,35
12.	A12 - A13	3,00	42.	A43 - A44	2,25	72.	A76 - A77	13,20
13.	A13 - A14	2,96	43.	A44 - A45	8,83	73.	A77 - A78	13,36
14.	A14 - A15	8,39	44.	A45 - A47	18,69	74.	A78 - A79	22,55
15.	A15 - A16	22,13	45.	A46 - A48	3,79	75.	A79 - A80	4,75
16.	A16 - A17	14,74	46.	A48 - A49	19,27	76.	A80 - A81	22,15
17.	A17 - A18	11,15	47.	A49 - A51	18,34	77.	A81 - A82	6,63
18.	A18 - A19	1,87	48.	A50 - A52	9,78	78.	A82 - A83	3,70
19.	A19 - A20	7,28	49.	A52 - A53	13,62	79.	A83 - A84	3,76
20.	A20 - A21	6,25	50.	A53 - A54	4,18	80.	A84 - A85	5,71
21.	A21 - A22	3,83	51.	A54 - A55	2,55			
22.	A22 - A23	4,41	52.	A55 - A56	2,93			
23.	A23 - A24	4,22	53.	A56 - A57	3,06			
24.	A24 - A25	3,73	54.	A57 - A58	2,64			
25.	A25 - A26	8,58	55.	A58 - A59	4,30			
26.	A26 - A27	4,74	56.	A59 - A60	12,85			
27.	A27 - A28	18,90	57.	A60 - A61	1,25			
28.	A28 - A29	12,97	58.	A61 - A62	4,31			
29.	A29 - A30	23,65	59.	A62 - A63	20,63			
30.	A30 - A31	19,07	60.	A63 - A64	9,97			

3.5.1 Zpětné úseky

V tabulce Tab. 3.1 je možné vidět, že při výpočtu došlo k situaci, kdy vznikly čtyři výpočetní úseky se zápornou hodnotou indukovaného napětí. Jedná se o takzvané zpětné úseky, jejichž záporná hodnota je dána tím, že se pozičně vzhledem k celkovému směru počítaného kabelového úseku vůči silovému vedení otáčí směrem zpět a při platnosti Lenzova zákona se v nich indukuje napětí opačného směru k směru napětí ve většině počítaných úseků.



Obr. 3.6 Příklad vyobrazení zpětných úseků

3.5.2 Výsledná hodnota napětí

Součtem dílčích hodnot indukovaných napětí jednotlivých výpočetních úseků (viz. Tab. 3.1) je získána celková hodnota indukovaného napětí vznikající nebezpečným induktivním vlivem v celém počítaném sdělovacím vedení.

$$U_i = U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{i80} = \sum U_{i(1 \div 80)} = 760,1 \text{ V}$$

3.5.3 Zhodnocení

Celkovým manuálním výpočtem bylo zjištěno, že při nebezpečném induktivním vlivu, který vznikne nastolením jednofázového zkratu v silovém vedení 400 kV, vznikne v počítaném sdělovacím vedení kabelového úseku napětí o hodnotě $U_i = 760,1 \text{ V}$.

Doba vzniklé poruchové situace na silovém vedení, mezi níž patří i jednofázový zkrat, sestává z doby nastavení hlavní ochrany a vlastní doby reakce vypínače. Provozovatel projektovaného silového vedení 400 kV ČEPS se zaručuje, že doba trvání poruchové situace nepřesáhne 0,3 s. Pro tento časový interval platí mezní dovolená hodnota indukovaného napětí (viz. Tab. 2.3) $U_{dov} \leq 300 \text{ V}$. Jelikož ve zde počítaném sdělovacím vedení je dovolená hodnota napětí překročena, bude nutné provést nezbytná opatření pro snížení hodnoty pod dovolený limit.

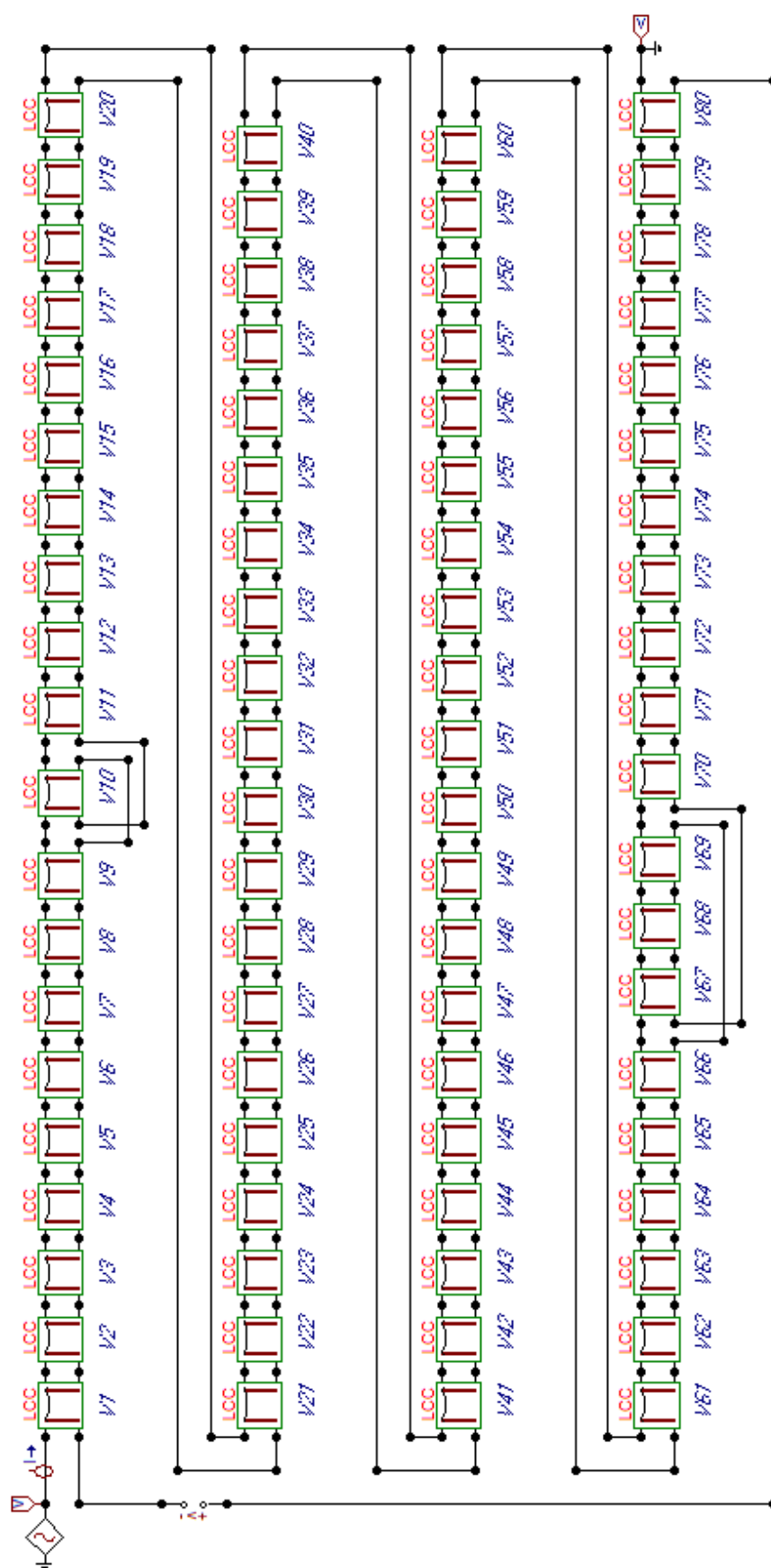
3.6 Výpočet pomocí EMTP-ATP

Pomocí programu EMTP-ATP je možné nasimulovat celkovou počítanou reálnou situaci, dle uvedených postupů nastavením jednotlivých prvků uvedených v podkapitole 2.5. Hodnoty použité ve výpočtu manuálním postupem budou zde do modelovaných prvků vloženy a následně bude zkoumána výstupní hodnota napětí.

3.6.1 Model reálné počítané situace

Pro usnadnění simulace v programu EMTP-ATP je využito již známých skutečností. Jednou z nich je způsob napájení silového vedení. Jak již bylo řečeno, projektované silové vedení bude vsazeno do stávající sítě přenosové soustavy. Namodelování celé přenosové soustavy a její parametrické nastavení pro zajištění přesných hodnot zkratového proudu v počítaném úseku by bylo velmi složité. Protože k výpočtu je potřeba nejvyšší hodnota zkratového proudu, které se dosáhne v místě výpočtu z jedné strany napájení, tedy rozvodny Řeporyje, je do simulace vložen pouze jeden zdroj napětí simulující právě tuto rozvodnu.

Počítaná trasa kabelového vedení je vzhledem k své rozličnosti rozdělena pomocí krajních šířek na celkem osmdesát výpočetních úseků. V simulaci nelze namodelovat jedním prvkem celou kabelovou trasu, ale jen právě výpočetní úseky. Každý jednotlivý výpočetní úsek je charakteristický svými délkovými parametry, tedy délkou l a ekvivalentní šířkou a výpočetního úseku. Technický výkres situace je uveden v přílohách (Příloha F – výkres F-02).



Obr. 3.7 Model počítaného kabelového vedení

Model celé situace pro zjištění nebezpečného induktivního vlivu v počítaném kabelovém úseku je nasimulován a sestaven z napájecího zdroje a dále z osmdesáti prvků LCC, kde každý simuluje za sebou jdoucí výpočetní úseky. Tedy k napájecímu proudovému zdroji je připojen silový vodič, který je rozložen v prvcích LCC a na konci posledního prvku je pro zajištění zkratové poruchy přímo uzemněn.

Kabelové výstupy z LCC prvků jsou vzájemně propojeny a pro zjištění indukovaného napětí, vzniklé induktivním vlivem procházejícího zkratového proudu v namodelovaném silovém vedení, je do toho obvodu zařazena napěťová sonda, která toto napětí měří.

Ve výpočetním modelu je možné spatřit určité prvky LCC, konkrétně V10 a V67 – V69, které mají kabelové výstupy do celkového obvodu zapojeny opačně. Je to proto, že jde o zpětné výpočetní úseky, jejichž význam je popsán v podkapitole 3.5.1, a tímto způsobem zapojení je zajištěno jejich namodelování a následný vznik inverzní hodnoty indukovaného napětí k hodnotě celkové.

3.6.2 Výstup simulace

Cílovým výstupem této simulace je grafický průběh naindukovaného napětí v počítaném kabelovém vedení, jehož grafický průběh je obdobný jako u vzorového příkladu Obr. 2.11. V takto získaném napěťovém průběhu je pro řešenou situaci podstatná především efektivní hodnota napětí, která v tomto případě činí

$$U_i = 749,6 \text{ V}$$

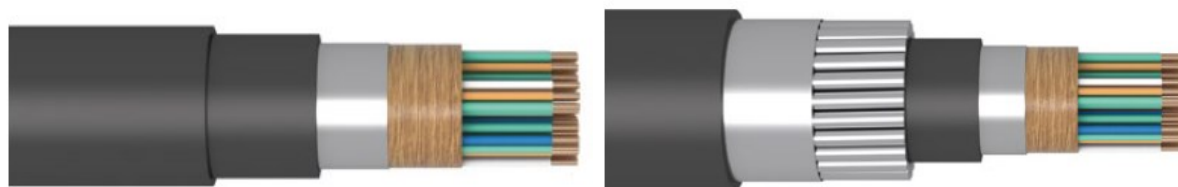
4 Opatření pro snížení vlivu indukovaného napětí

Vypočtené hodnoty vzniklé vlivem silového vedení na sdělovací kabelové vedení mají striktně určené meze dle doby trvání zkratu *Tab. 2.3*. Vyjde-li vypočtená hodnota indukovaného napětí na hraně těchto mezí, žádná další opatření vedoucí ke snížení tohoto napětí se z ekonomických důvodů nezavádí, protože případným praktickým ověřováním by se dosáhlo menších hodnot.

Přesahuje-li však indukované napětí znatelně normou stanovenou mez, je třeba zavést opatření, které povedou ke snížení nebo k zamezení nadměrných hodnot indukovaného napětí.

4.1 Změna typu sdělovacího kabelu

Za logicky nejjednodušší způsob k snížení naindukovaného napětí je možné považovat nahrazení stávajícího sdělovacího kabelu typu TCEPKPFLE za kabel typu TCEPKPFLEZE. Tento nový typ kabelu je obdobný jako předešlý typ, ovšem doplněný stíněním provedeným Al drátovým armováním v plášti kabelu.



Obr. 4.1 Sdělovací kabel typu TCEPKPFLE (vlevo) a TCEPKPFLEZE (vpravo) [15]

Tím je dosaženo výrazného snížení celkového redukčního činitele na straně ovlivňovaného vedení na hodnotu $r_s = 0,16$. Hodnota je odečtena z tabulky uvedená v přílohách (Příloha B – tab. č. V).

V případě dosazení do zde počítaného sdělovacího kabelového úseku vychází celkový redukční činitel

$$r_v = r_e \cdot r_s = 0,487 \cdot 0,16 = 0,078$$

a následným dosazením do výpočtů indukovaných napětí pro jednotlivé výpočetní úseky vychází celkové naindukované napětí pro celý počítaný kabelový úsek

$$U_i = 133,7 \text{ V}$$

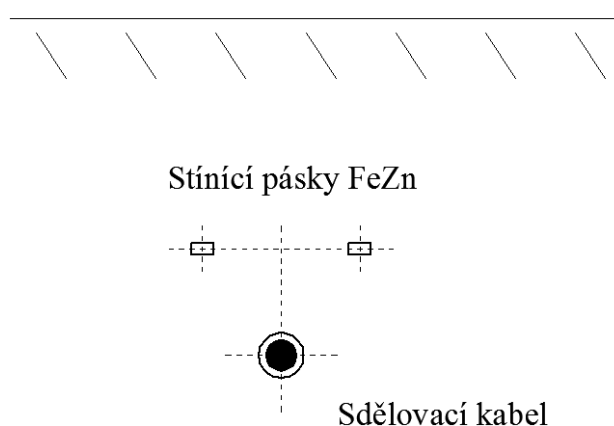
Takto vysoké naindukované napětí je pro celkovou počítanou situaci z pohledu normy již zcela akceptovatelné.

V případě je-li ve společné trase položeno několik kabelů stejného nebo podobného provedení, je vhodné vodiče spojit pláště a jiné stínící ochrany všech kabelů mezi sebou, a to ve všech místech, kde jsou obaly uzemněny, minimálně však na koncích společné trasy. Čímž se dosáhne dalších zlepšujících vlastností na straně ovlivňovaných vedení. [8]

4.2 Externí stínění pomocí kompenzačních vodičů

Další možností snížení hodnoty indukovaného napětí v kabelovém vodiči je použití tzv. kompenzačního vodiče. Takovýto kompenzační vodič musí být rovnoběžně jdoucí se sdělovacím kabelem ve vzájemné vzdálenosti maximálně do 1 m.

Kompenzační vodič musí být uzemněn minimálně na obou koncích celkového kabelového vedení s minimálními odpory vůči vlastním impedancím. Materiál těchto vodičů musí být dobře elektricky vodivý a dostatečně chemicky odolný, což splňují nejčastěji používané pásy FeZn, které jsou umístěné většinou nad sdělovacím kabelem. V některých případech se v určitých úsecích kompenzační vodiče ještě vodivě propojí se stíněním kabelu.

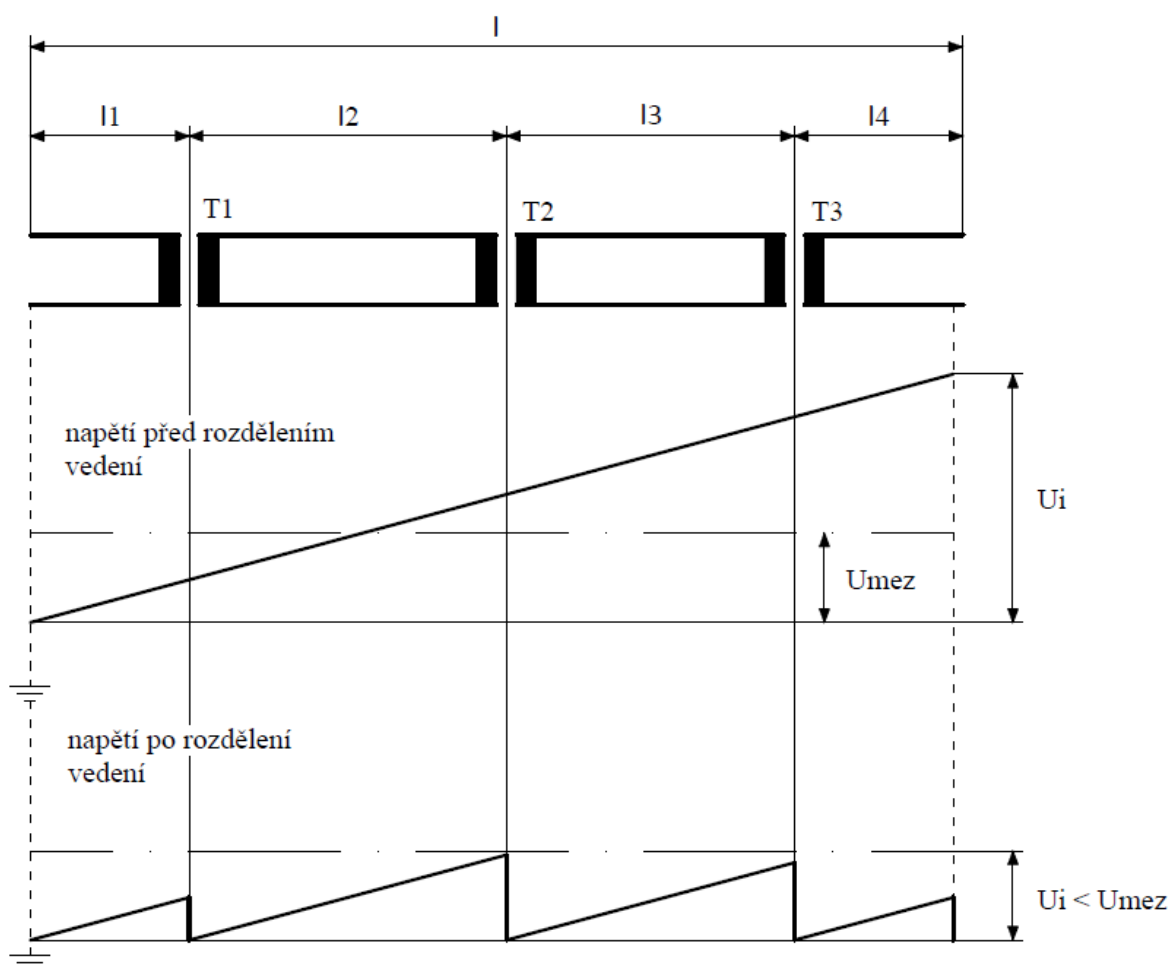


Obr. 4.2 Pozici vyobrazení kompenzačních vodičů

Zde popisované kompenzační stínění je takzvané neúplné stínění. Aby však bylo dosaženo ještě většího stínění ve zvláště ohrožených místech, používá se takzvané úplné stínění. Mezi nejběžnější je možné uvést desky nebo trubky z elektricky vodivých materiálů, u nichž musí být zajištěno dobré vodivé spojení jednotlivých dílů. [8]

4.3 Oddělovací transformátory

Dalším možným způsobem může být rozdělení celé délky kabelu sdělovacího vedení na dílčí úseky. Propojení dílčích úseků se provádí pomocí oddělovacích transformátorů. Zde se hodnota indukovaného napětí vzniklá induktivním vlivem následně počítá samostatně pro jednotlivé dílčí úseky.



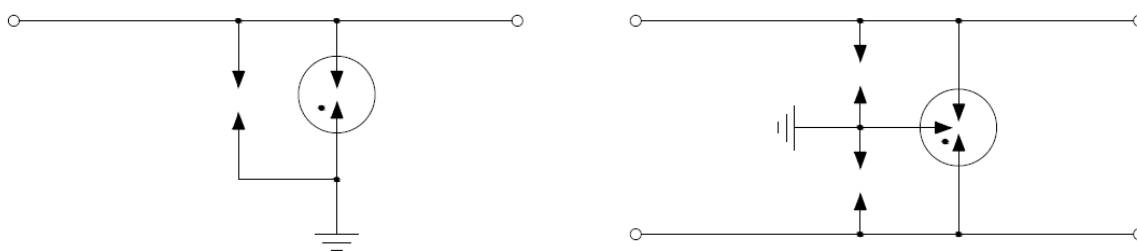
Obr. 4.3 Ochrana sdělovacích vedení oddělovacími transformátory [8]

Celková délka ovlivňovaného kabelového úseku l se rozdělí podle potřeby pomocí oddělovacích transformátorů na několik úseků tak, aby hodnota naindukovaného napětí U_i mezi dvěma sousedními transformátory nebyla větší než dovolená mezní hodnota nebezpečného vlivu U_{mez} . [8]

4.4 Omezovače přepětí (bleskojistky)

Výše uvedené možnosti pro snížení indukovaného napětí by v případě zavedení do již provozovaného kabelového vedení byly velice nákladné. Proto se musí provést opatření, které tomu vyhovují a při kterých není potřeba zasahovat do celkové délky ovlivňovaného kabelového vedení. Jednou z těchto možností jsou omezovače přepětí neboli bleskojistky.

Proti nebezpečnému indukčnímu vlivu ve sdělovacím kabelovém vedení je vhodné použít dvouelektrodové případně trojelektrodové bleskojistky.

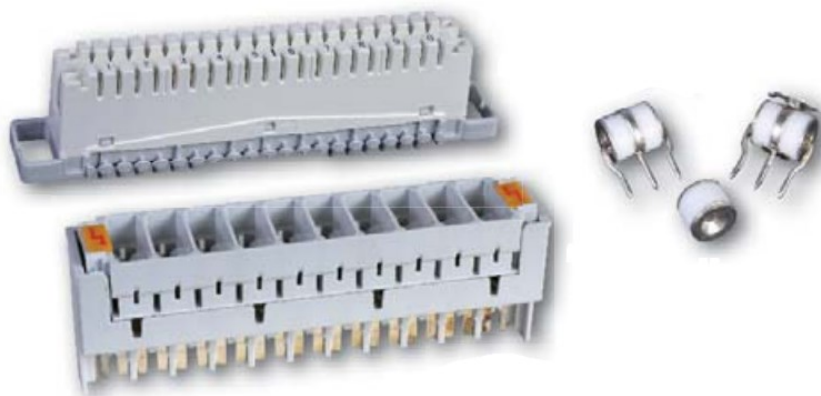


Obr. 4.4 Obvodové zapojení dvou a trojelektrodové bleskojistky doplněné jiskřištěm [9]

Tento typ bleskojistik by měl snést zatížení střídavým proudem min. 10 A pro dobu 1 s na jednu elektrodu opakovaně, aniž by u ní nastaly nepřijatelné změny parametrů. Především musí být bleskojistka dimenzována tak, aby zhášecí napětí bylo vyšší než provozní napětí sdělovacího vedení.

Dále by se měly bleskojistky používat na ochranu sdělovacích vedení při nebezpečném krátkodobém vlivu jen tehdy, když je přípustné krátkodobé přerušení provozu vedení po dobu, kdy je bleskojistka zapálena a to na všechny okruhy sdělovacího vedení.

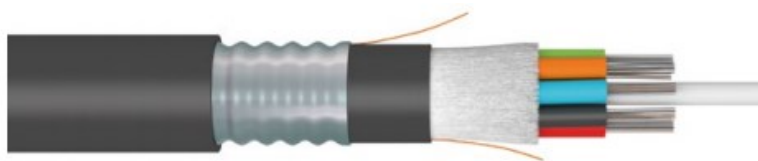
Bleskojistky se proti induktivnímu vlivu musí umístit na obou koncích souběhu sdělovacího a silového vedení, přičemž je důležité, aby byly v blízkosti místa, kde souběh právě končí. V případě, že toto opatření nepostačuje, rozdělí se souběh na úseky s bleskojiskami tak, aby na nich indukované napětí nepřekračovalo dovolenou mez. [8], [9]



Obr. 4.5 Omezovače přepětí typu BB a BTR se zásobníkem [16]

4.5 Použití optických kabelů

Nelze opomenout možnost použití moderního optického kabelu, který se svou materiální skladbou je vůči elektromagnetickým vlivům zcela imunní. Uložení tohoto typu kabelu do země ovšem může v případě nutnosti vzniknout situace, kdy nebude možné najít přesnou polohu umístění kabelu. Proto se s optickým kabelem pokládá i kovový vodič pro jisté zjištění polohy, s tím ovšem vzniká opět induktivní vliv na tento vodič. Další možností je opatřit optický kabel určitými elektronickými prvky, pomocí nichž je možné taktéž polohu zjistit, zde ale opět narůstají další finanční náklady.



Obr. 4.6 Sdělovací optický kabel [15]

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo blíže osvětlit problematiku možné interference silového vedení přenosové soustavy 400 kV na sdělovací především kabelové vedení, dále podrobně rozebrat postup výpočtu induktivního vlivu silového vedení a provést vzorový výpočet a tím ověřit schopnost výpočtu programu EMTP-ATP k následnému reálnému výpočtu.

V první části byla popsána problematika elektromagnetické kompatibility obecně. Vysvětlení základního principu a následné rozdělení na dvě základní části elektromagnetická interference a elektromagnetická susceptibilita. Z nichž následovalo základní rozdělení a posléze zaměření se k bližší problematice rušivých vlivů silového nadzemního vedení na své okolí.

Další část práce byla věnována rozboru způsobu výpočtu induktivního vlivu nejčastější situace v reálném provozu a to nadzemního silového vedení na sdělovací kabelové vedení. Jelikož sdělovací kabelové vedení je v zemi uloženo velice rozličně, bylo nutné proto podrobně popsat způsob možného částečného zjednodušení sdělovacího vedení a rozdělení na jednotlivé výpočetní úseky, dle dohod a podmínek stanovených normou. Vzniknout mohou výpočetní situace a to přiblížení se kabelového vedení k silovému vedení nebo křížení obou vedení.

Následovala část zabývající se členy základní výpočetní rovnice (2.6). Jedním z nich je zkratový proud. Zde bylo popsáno přesné určení nejhoršího místa zkratu a zjištění správné hodnoty zkratového proudu použitelné do výpočtu. Dále byla rozebrána podkapitola zabývající se celkovým redukčním činitelem. Redukční činitel zasahující do obou vedení má zásadní vliv na celkovou hodnotu naindukovaného napětí. Jelikož zastupuje vlastnosti vodičů vedení a dále pak i jejich situční vlastnosti k okolnímu prostředí. V neposlední řadě byl z Biotova-Savartova zákona odvozen a vysvětlen činitel vzájemné indukčnosti vznikající mezi oběma vedeními v době zkratu v silovém vedení. Po vysvětlení všech členů byl následně demonstrován vzorový způsob výpočtu zjednodušeného příkladu podle normou daného postupu. Poté následovala možnost výpočtu pomocí programu EMTP-ATP. Zde bylo vysvětlen způsob zadání všech vstupních výpočetních hodnot do prostředí programu a provedena tak simulace vzorového příkladu. Tím byla ověřena možná schopnost výpočtu daného typu příkladu programem EMTP-ATP, neboť výsledné hodnoty obou způsobů se shodovaly.

Ve třetí části byl proveden výpočet nebezpečných vlivů reálného projektovaného silového vedení přenosové soustavy V413 v úseku Řeporyje – Mírovka o celkové délce 146 km. Zjištěním všech potřebných náležitostí bylo prvním způsobem výpočtu, za pomoci manuálního postupu, vypočteno pro celý řešený kabelový úsek indukované napětí o hodnotě $U_i = 760,1$ V. Následným namodelováním a výpočtem v programu EMTP-ATP byla pro stejný případ zjištěna hodnota $U_i = 749,6$ V.

Rozdíl obou hodnot činí 10,5 V, což představuje necelý dvouprocentní rozdíl, je ve výsledku téměř zanedbatelný. Procentuální rozdíl není až tak markantní a v obou případech je hodnota napětí, dle maximální doby trvání zkratu, daleko za mezní povolenou hodnotou $U_{dov} \leq 300$ V. Ovšem veškeré výpočty jsou prováděny teoretickými předpoklady a hodnotami, a proto výpočetní postupy mají nastaveny pro tuto skutečnost bezpečnou rezervu. Dále při praktickém ověřování indukovaných napětí

dochází zpravidla ke změření nižších hodnot, než jsou hodnoty spočtené, neboť nelze do výpočtů s přesností zjistit případné redukující skutečnosti sdělovacích kabelů.

Závěrečná část byla věnována způsobům eliminace vzniklých nebezpečných vlivů překračujících dovolenou mez. Nejprve byly rozebrány způsoby snížení, mezi něž se řadí například změna typu sdělovacího kabelu za typ mající v plášti ochranné stínění a také externí stínění nacházející se v blízkosti sdělovacího kabelu. Tyto použité způsoby mají za následek snížení redukčního činitele na straně sdělovacího kabelu a následně i snížení hodnoty indukčního napětí. Další možností eliminace bylo rozdělení celkového sdělovacího vedení oddělovacími transformátory na jednotlivé kabelové úseky. Dále byla uvedena pro již provozovaná sdělovací vedení varianta zamezení indukovaného napětí za pomoci omezovačů přepětí neboli bleskojistek. Na závěr byla zmíněna varianta změny metalického kabelu za dnes moderní optický kabel, který je vůči induktivním vlivům zcela imunní.

Hlavním cílem této práce, jimž bylo vypočítat složitější reálnou situaci induktivního vlivu a následně ověřit i možnost výpočtu programem EMTP-ATP, bylo zjištěno, že program je zcela schopný vypočítat i tyto složité situace a je jej možné tak zařadit do běžného užívání k zjišťování vlivů. Tato práce může být námětem na další řešení možného zjednodušení výpočtu induktivního vlivu a případně posloužit také k revidování stávající normy.

Literatura

- [1] NASSER D. TLEIS. *Power systems modelling and fault analysis: theory and practice*. Oxford, UK: Newnes, 2008. ISBN 978-0-7506-8074-5.
- [2] POLÁK, Josef; VELETA, Pavel. *Rukověť katodické protikorozi ochrany*. Praha: Český plynárenský svaz, 2002. ISBN 80-239-0281-4.
- [3] KVASNICA, Jozef. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: Academia, 1985.
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [5] HONIŠ, René; KONEČNÝ, Milan; GALETKA, Martin; ULLMAN, Ivo. *Přenosová soustava České republiky*. [Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2014]. ISBN 978-80-905392-3-5.
- [6] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [7] MACH, Veleslav. *Technika vysokého napětí*. Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1161-8.
- [8] ČSN 33 2160: Elektrotechnické předpisy ČSN. *Předpisy pro ochranu sdělovacích vedení a zařízení před nebezpečnými vlivy trojfázových vedení vn, vvn a zvn*. Praha: ÚNMZ, 1993.
- [9] ČSN 33 4010: Elektrotechnické předpisy ČSN. *Ochrana sdělovacích vedení a zařízení proti přepětí a nadproudu atmosférického původu*. Praha: ÚNMZ, 1990.
- [10] ČSN EN 60909-0. Elektrotechnické předpisy ČSN. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0: Výpočet proudů*. Praha: ÚNMZ, 2002.
- [11] MACH, Veleslav. *Vybrané principy elektroenergetiky* [Online]. [Cit. 2018-2-2]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/>
- [12] ČEPS, a.s.. [Online]. [Cit. 2018-1-19]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/cs/>
- [13] ČEPS, a.s.. *Výstavba přenosové soustavy* [Online]. [Cit. 2018-1-19]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/cs/ke-stazeni>
- [14] *Elektromagnetická kompatibilita (přednášky)* [Online]. [Cit. 2018-3-19]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/prednasky_emc.htm
- [15] *Katalogy metalických a optických kabelů 2018* [Online]. [Cit. 2018-3-15]. Dostupné z: <http://www.kabelovna.cz/ke-stazeni.html>
- [16] *Katalog svodičů bleskových proudů a přepětí* [Online]. [Cit. 2018-3-15]. Dostupné z: http://www.citel.cz/ke_stazeni/

Seznam příloh

- Příloha A: Prostorové grafické znázornění výpočetních úseků
- Příloha B: Tabulky redukčních činitelů vybraných vodičů a kabelů
- Příloha C: Tabulka činitelů vzájemných indukčností
- Příloha D: Grafický náhled stožáru typu „portál“ s patřičnými měrnými rozměry
- Příloha E: Tabulka manuálních výpočtů indukovaných napětí – program MS Excel
- Příloha F: F-01 Výkres – Silové vedení V413 procházející řešeným zájmovým územím – A4
F-02 Výkres – Rozdělení počítaného kabelového vedení krajními šířkami – A4